SISTEMAS ACUAPÓNICOS PARA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Combinando la Acuicultura e Hidroponía Como Tecnologías de Producción en el Futuro.

TRADUCIDO Y EDITADO AL IDIOMA ESPAÑOL
DE AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS

Universidad de la Amazonia
Vigilada MinEducación

ISBN: 978-958-5484-92-4

Simon Goddek - Alyssa Joyce -
Benz Kotzen - Gavin M. Burnell
Editores versión en Inglés

SISTEMAS ACUAPÓNICOS PARA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Combinando la Acuicultura y la Hidroponía Como Tecnologías de Producción en el Futuro.

TRADUCIDO Y EDITADO AL IDIOMA ESPAÑOL
DE AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS

Sistemas acuapónicos para producción de alimentos.

SISTEMAS ACUAPÓNICOS PARA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Combinando la Acuicultura e Hidroponía como Tecnologías de Producción en el Futuro.

TRADUCIDO Y EDITADO AL IDIOMA ESPAÑOL DE AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS POR:

Jorge Eduardo Franco Paez - Angela Julieth Aragon Correa
Hernán Camilo Ramos Caldón - Dick Adolfo Ramírez Chaux
Diana Carolina Betancour Murcia - Mayorly Lugo Escobar
María Fernanda Tobar Tello - Jenny Lorena Rosero Solarte

Esta obra es producto de la traducción de "*Aquaponics Food Production Systems Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*" La democratización del conocimiento es el verdadero potencial que tiene la humanidad para trascender, a pesar de los grandes avances en tecnología y la existencia de múltiples programas, aplicaciones, apps etc. que pueden llegar a traducir de un idioma a otro; en muchas regiones del mundo si aún no tienen servicios públicos básicos, mucho menos la posibilidad de acceder a servicios de internet, que les permita ampliar sus capacidades técnicas que al ser aplicadas en sus diferentes sistemas productivos podrían llegar a mejorar la calidad de vida de poblaciones y sociedades completas. Es por lo tanto nuestro deber como investigadores que tenemos el privilegio de tener acceso a recursos aportados por todos los contribuyentes de generar conocimiento y compartirlo de la manera más sencilla a absolutamente todo aquel que lo necesite y quiera. Este libro es actual y nos conduce de manera practica al desarrollo de la ACUAPONÍA a menor o mayor escala. Usándolo como guía se puede aprender de manera autodidacta e impactar su región sea grande o pequeña. Esta obra está enmarcada bajo el Proyecto de Validación Tecnológica: Implementación de un proceso de innovación para el cultivo de pirarucú (*Arapaima gigas*) bajo un sistema de siembra con recirculación acuícola integrado a la producción de hortalizas en sistemas acuapónicos en el departamento del Caquetá.

ASOCIACIÓN DE ACUICULTORES DEL CAQUETÁ
ACUICA

Universidad de la Amazonia
Vigilada MinEducación

Sistemas Acuapónicos Para Producción de Alimentos.
Combinando la Acuicultura e Hidroponía como Tecnologías de Producción en el Futuro.

Traducido y editado al Idioma Español por:

Jorge Eduardo Franco Paez
Zootecnista, Universidad de la Amazonia.
Especialista en Gerencia de Empresas Agropecuarias, Universidad Santo Tomas.
Estudiante de Doctorado en Ciencias Naturales y Desarrollo Sustentable
Universidad de la Amazonia. Florencia- Caquetá, Colombia

Angela Julieth Aragon Correa
Economista, Universidad del Quindío - UniQuindío
Magíster en Planeación para el Desarrollo de la Universidad Santo Tomas - USTA. Florencia- Caquetá, Colombia

Hernán Camilo Ramos Caldón
Médico Veterinario Zootecnista, Universidad de la Amazonia.
Florencia- Caquetá, Colombia

Dick Adolfo Ramírez Chaux
Médico Veterinario Zootecnista, Universidad de la Amazonia.
Florencia- Caquetá, Colombia

Diana Carolina Betancour Murcia
Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander – UIS.
Especialista en Pedagogía, Universidad de la Amazonia.
Florencia- Caquetá, Colombia

Mayorly Lugo Escobar
Ingeniera Agroecóloga, Universidad de la Amazonia.
Estudiante de Maestría de Sistemas Sostenibles de Producción, Universidad de la Amazonia. Florencia- Caquetá, Colombia.

María Fernanda Tobar Tello
Ingeniera Acuícola de la Universidad de Nariño – UDENAR
Pasto- Nariño, Colombia

Jenny Lorena Rosero Solarte
Ingeniera Acuícola de la Universidad de Nariño – UDENAR.
Puerto Asís, Putumayo - Colombia.

Entidad ejecutora
UNIVERSIDAD DE LA AMAZONIA

Fabio Buriticá Bermeo
Rector
William David Grimaldo Sarmiento
Secretario general.
Javier Martínez Plazas
Vicerrector Académico.
Edna Margarita Plazas Medina
Vicerrectora administrativa
Juan Carlos Suárez Salazar
Vicerrector de Investigación e Innovación

ALIADOS ESTRATÉGICOS

Sistema General de Regalías – SGR.
Almacén INSUAGRO LTDA.
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA.
Asociación de Acuicultores del Caquetá – ACUICA.

TRADUCCIÓN AL ESPAÑOL
D*e Aquaponics Food Production Systems*

PUBLICADO EN ESPAÑOL POR
Editorial - Universidad de la Amazonia
2023

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN:
Editorial Universidad de la Amazonia

Esta Obra está enmarcada bajo el Proyecto de Validación Tecnológica Implementación de un proceso de innovación para el cultivo de pirarucú (*Arapaima gigas*) bajo un sistema de siembra con recirculación acuícola integrado a la producción de hortalizas en sistemas acuapónicos en el departamento del Caquetá.

Título de la obra
Sistemas acuapónicos para producción de alimentos combinando la acuicultura e hidroponía como tecnologías de producción en el futuro

Esta obra deberá ser citada de la siguiente manera:

Franco Paez, J.E.; Aragón Correa,A.J.; Ramos Caldón, H.C.; Ramírez Chaux, D.A.; Betancour Murcia, D.C.; Tobar Tello, M.F; Rosero Solarte, J.L. & Lugo Escobar, M. (2023). Sistemas acuapónicos para producción de alimentos combinando la acuicultura e hidroponía como tecnologías de producción en el futuro (*Traducción de Aquaponics Food Production Systems*). Editorial Universidad de la Amazonia. 814pp. Tamaño (16x24cm). Incluye bibliografía.

© Editorial - Universidad de la Amazonia

ISBN en español (Digital): 978-958-5484-93-1
ISBN en español (Impreso): 978-958-5484-92-4

Primera edición, 2023

Palabra claves: Acuaponía; Hidroponía; Tecnología; Acuicultura; Producción

Tiraje: 200
Diseño y diagramación:
Editorial Universidad de la Amazonia

Universidad de la Amazonia
Vicerrectoría de Investigación e Innovación

"El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del (los) autor(es) y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de la Amazonia, ni genera su responsabilidad frente a terceros. El (los) autor(es) asume(n) la responsabilidad por los derechos de autor y conexos contenidos en la obra, así como por la eventual información sensible publicada en ella" Florencia, Caquetá, Colombia.

Universidad de la Amazonia
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
EDITORIAL UNIVERSIDAD DE LA AMAZONIA

Prohibida la reproducción total o parcial de este con fines comerciales.
Su utilización se puede realizar con carácter académico, siempre que se cite la fuente.
Contacto: vrinvestigaciones@udla.edu.co - editorial@uniamazonia.edu.co
Florencia - Caquetá, 2023

EDITORES

Simon Goddek
Mathematical and Statistical Methods
(Biometris)
Wageningen University
Wageningen, The Netherlands

Benz Kotzen
School of Design University of Greenwich London, UK

Alyssa Joyce
Department of Marine Science
University of Gothenburg
Gothenburg, Sweden

Gavin M. Burnell
School of Biological, Earth and Environmental Sciences
University College Cork
Cork, Ireland

ISBN: 978-3-030-15942-9
ISBN (eBook): 978-3-030-15943-6
DOI en inglés: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6

© El (los) editor (es) (si corresponde) y el (los) autor (es) 2019.

Este libro es una publicación de acceso abierto.
Acceso abierto: Este libro tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el uso compartido, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que se otorgue el crédito correspondiente al autor o autores originales y a la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este libro están incluidos en la licencia Creative Commons del libro, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del libro y su uso previsto no está permitido por la regulación legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

El uso de nombres descriptivos generales, nombres registrados, marcas registradas, marcas de servicio, etc. en esta publicación no implica, incluso en ausencia de una declaración específica, que dichos nombres estén exentos de las disposiciones pertinentes, leyes y regulaciones protectoras y, por lo tanto, gratis para uso general.

El editor, los autores y los editores pueden asumir con seguridad que los consejos y la información de este libro se consideran verdaderos y precisos en la fecha de publicación. Ni el editor ni los autores o los editores dan garantía, expresa o implícita, con respecto al material contenido en este documento o por cualquier error u omisión que pueda haberse cometido. El editor se mantiene neutral con respecto a los reclamos jurisdiccionales en mapas publicados y afiliaciones institucionales.

PALABRAS CLAVES

ADM1: Modelo de Digestión Anaerobia # 1
AnMBR: Bioreactor de Membrana Anaeróbica
AP: Sistemas Acuaponicos
BCA: Agentes de Bio-control
BCA: Agentes de Biocontrol.
BFT: Tecnología Biofloc
Ca^{2+}: Catión de Calcio.
CAPEX: Gasto de Capital
CE: Conductividad Eléctrica
CEA: Agricultura de Ambiente Controlado.
CFL: Lámparas Fluorescentes Compactas
CH_4: Metano
CLD: Diagramas de Bucle Causal
CSTR: Reactor de Tanque Agitado Continúo
CV: Variable Controlada
DA: Digestión Anaerobia
DBO: Demanda Biológica de Oxigeno
DM: Masa Seca
DQO: Demanda Química de Oxigeno
EMS: Modelo de Sistema de Energía.
ETc: Evo Transpiración del Sistema
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
FIFO: Relación Pescado-Pescado
FM: Harina de Pescado
FO: Aceite de Pescado
GEI: Gases Efecto Invernadero
KH_2PO_4: Fosfato Dihidrogeno.
H_2S: Sulfuro de Hidrogeno
HP: Hidropónico
HPS: Iluminación de Sodio de Alta Presión
HR: Humedad Relativa.
HRT: Tiempo de Retención Hidráulica
HRT: Tiempos Hidráulicos
IAAC: Sistemas Integrados de Acuicultura
IHP: Invernaderos Hidropónicos
IMTA: Acuicultura Multitrófica Integrada en Tierra
IS: Intensificación Sostenible.
K+: Ion de Potasio
LCFA: Ácidos Grasos de Cadena Larga
LED: Iluminación por Diodos Emisores de Luz
MAS: Sistema de Múltiples Agentes.
MH: Iluminación de Haluro Metálico
MIP: Manejo Integrado de Plagas en Plantas.
MV: Variable Manipulada
NH^{3+}/NH^{4+}: Nitrógeno Amoniacal Total
Nh^{4+}: Amonio
NO_2: Óxido Nitroso.

PALABRAS CLAVES

NO_3: Nitrato
NO_3-N: Nitrógeno
OM: Materia Orgánica
ONU: Organización de las Naciones Unidas.
OPEX: Costo Total del Gasto Operativo
PAP: Proteínas Procesadas no Rumiantes.
PGPR: Promotores de Crecimiento Vegetal.
PI- o- PID: Control Proporcional Integral Derivado
PO_4: Fosfato
REG: Tasa de Evacuación Gástrica
SA: Acuaponía de Agua de Mar
SBR: Reactor por Lotes de Secuenciación
SFD: Diagramas de Stock y Flujo
SMARTHOOD: Vecindario Inteligente "Concepto de una Micro Red de Alimentos, Agua y Energía Totalmente Integrada y Descentralizada".
SRT: Tiempos de Retención de Lodos
STS: Ciencia de la Sostenibilidad, la Investigación y la Sociedad.
TAN: Nitrógeno de Amoniaco Total
TS: Sólidos Totales
TSS: Sólidos Suspendidos Totales
UASB: Sistema de Reactor de Lodos Secuencial de 2 Etapas
UVI: Universidad de las Islas Vírgenes
VFA: Ácidos Grasos Volátiles
VFS: Sistema de Cultivo Vertical
DESAMILATORIA: Es la conversión del nitrato y nitrito a la forma sólida N2O y a la forma ion amonio. Se produce en estercoleros y turberas donde residen bacterias del género *Nitrobacter* sp.
EPINASTIA: Síntoma de un vegetal en el que las hojas experimentan una curvatura hacia abajo, debida a un exceso de luz, calor o condiciones de anaerobiosis; terminando las hojas por marchitarse rápidamente.
METATRANSCRIPTÓMICA: disciplina que estudia la expresión génica de los microbios en entornos naturales, es decir, el metatranscriptoma. También permite obtener perfiles completos de expresión génica de comunidades microbianas complejas.
INMUNOMODULACIÓN: Cambio en el sistema inmunitario del cuerpo causado por sustancias que activan o debilitan su función.
POLIPONICA: La combinación de diferentes organismos acuáticos en un solo sistema acuapónico puede aumentar los rendimientos totales. Aplicado por primera vez por Naegel (1977), este principio de producción multiespecies fue acuñado del término policultivo combinado con acuaponía en sistemas acoplados como 'polyponic' (polyculture + aquaponics) de Knaus y Palm.
FITOSIDERÓFORO: son sustancias orgánicas (nicotinamina, ácido mugenésico, ácido avénico, etc.).
FLUORURO DE POLIVINILIDENO: PVDF es un fluoropolímero termoplástico altamente inerte químicamente. Se suele emplear en condiciones que requieren mucha pureza, fortaleza y elevada resistencia a ácidos, bases y disolventes, a altas temperaturas, al envejecimiento y a los rayos ultravioleta.

PRESENTACIÓN

La Traducción de esta Obra está enmarcada bajo el Proyecto de Validación Tecnológica: Implementación de un proceso de innovación para el cultivo de pirarucú (*Arapaima gigas*) bajo un sistema de siembra con recirculación acuícola integrado a la producción de hortalizas en sistemas acuapónicos en el departamento del Caquetá.

El futuro de la humanidad siempre dependerá de la eficiencia con que podamos producir alimentos para atender la demanda de una población en constante crecimiento. La revolución verde trajo abundancia pero al mismo tiempo desencadeno un impacto negativo en el medio ambiente; los monocultivos, el uso de fertilizantes químicos, herbicidas, fungicidas, maquinaria agrícola que consume combustibles fósiles, disminución de las reservas de agua han impactado de manera directa la huella de carbono y el calentamiento global, la especulación con los alimentos en las bolsas de valores y la presión sobre la frontera agrícola en los países que aun poseen bosques y selvas tropicales.

Si la especie humana quiere ser considerada verdaderamente evolucionada deberá pasar la frontera de los 70 mil años de dominio del globo terráqueo sin destruirlo; ese es nuestro verdadero desafío. El calentamiento global, la escasez de agua dulce, la disminución de las reservas de fertilizantes, los altos precios del petróleo, las pandemias globales y las guerras que bloquean el comercio internacional de materias primas. Nos han arrinconado y puesto a pensar en la producción de alimentos que garanticen la seguridad y autonomía alimentaria. El conocimiento acumulado por nuestros investigadores y la biodiversidad de las regiones, son la verdadera riqueza intangible. Es aquí donde toman importancia estos nuevos procesos donde se minimiza la producción de desechos, apalancados en la economía circular y su bajo impacto en la huella de carbono. Como habitantes de la región amazónica creemos que debemos implementar estos sistemas simbióticos donde el agua, los peces, las bacterias y las plantas trabajan en equipo para producir alimentos en áreas muy pequeñas, con un alto nivel de trazabilidad, cerca de los grandes centros de consumo, que ya son exitosos en otras regiones del planeta. El futuro se construye en el presente ese es el legado que como organizaciones queremos dejar a nuestra región que deberá seguir siendo denominada como el pulmón del mundo.

Jorge Eduardo Franco Paez.
Zootecnista, Estudiante de Doctorado en Ciencias Naturales y Desarrollo Sustentable, Universidad de la Amazonia

PREFACIO

Han pasado más de 45 años desde que apareció por primera vez en los cines el largometraje de ciencia Soylent Green (1973). La película fue profética para su época y predijo muchos de nuestros problemas ambientales actuales, incluidos los océanos moribundos, el efecto invernadero, la superpoblación y la pérdida de biodiversidad. Aunque esperamos que los humanos no sirvan como una futura fuente de nutrientes, los escenarios presentados en la película no están tan lejos de realizarse. Como investigadores y ciudadanos, cumplimos con nuestro deber de cuidar el medio ambiente y el resto de la población cada vez mayor de nuestro mundo. Nos preocupa que si retrocedemos e ignoramos las tendencias actuales en la explotación de los recursos y los métodos de producción, nuestro paraíso de un planeta estará condenado o, al menos, mucho más reducido, de modo que la vida en las superficies estériles de la Luna o Marte parecerá como una alternativa agradable. Las generaciones venideras nos responsabilizarán y deberían responsabilizarnos individual y colectivamente por el desastre que dejamos. Los numerosos autores de este libro están en una situación afortunada y desafortunada, ya que podemos ayudar a resolver problemas o ser responsables por las generaciones futuras por ser parte del problema. Cuando comenzamos la Acción COST FA1305 'El Centro de Aquaponia de la UE - Realizando la Producción Integrada Sostenible de Pescado y Vegetales para la UE', la acuaponía era una tecnología de nicho que, a escala industrial, no podía competir con las tecnologías independientes de hidroponía y acuicultura. Sin embargo, la tecnología acuapónica en la última década ha dado grandes pasos hacia la eficiencia y, por ende, la viabilidad económica a través de una amplia gama de avances tecnológicos. A medida que aumenta nuestra capacidad para comprender los costos ambientales de la agricultura industrial, somos más capaces de desarrollar tecnologías para garantizar que la agricultura sea más productiva y menos dañina para el medio ambiente. Este resultado positivo debe ser reforzado por los signos muy alentadores de que, si bien los jóvenes no están interesados estadísticamente en ser los agricultores del futuro, sí quieren ser futuros agricultores si la tecnología está involucrada y pueden adaptar estas tecnologías para vivir más cerca de los entornos urbanos. Y tener una mejor calidad de vida que en el pasado rural. Los niños de todas las edades están fascinados con la tecnología, y no es de extrañar que la tecnología resuelva muchos problemas. Sin embargo, al mismo tiempo, los niños (quizás menos con los adolescentes) también son conscientes del medio ambiente y entienden que el futuro de nuestro planeta está en la fusión de la naturaleza y la tecnología.

La tecnología nos permite ser más productivos y, aunque no tenemos la certeza de que podamos resolver un cambio climático de manera efectiva, todavía tenemos la esperanza de que haya un futuro en el que las personas estén saludables y alimentadas con alimentos nutritivos. Nosotros, los autores de este libro, nos damos cuenta de que no somos más que pequeños alevines en un mundo de peces mucho más grandes (a veces tiburones), pero estamos más que esperanzados, ciertamente confiados, de que la acuaponía tiene un papel que desempeñar en la futura producción de alimentos del mundo.

Dentro de la línea de tiempo de COST Action FA1305, nuestro objetivo fue acercar la acuaponía al público y crear conciencia sobre el cultivo alternativo. métodos El Comité de Gestión de la Acción tenía 90 expertos de 28 países de la UE, 2 países vecinos y 2 países socios internacionales. Nosotros organizamos 7 escuelas de formación en diferentes partes de Europa, con 92 alumnos de 21 países y 20 STSM se otorgaron a 18 primeros investigadores de carrera de 12 países. Lo más importante es que publicamos 59 videos basados en las escuelas de capacitación, todos los cuales están disponibles gratuitamente en YouTube
(https://www.youtube.com/EUAquaponicsHub).

Los miembros de Action colaboraron en la redacción de 24 artículos (19 de los cuales son de acceso abierto), capítulos de libros, monografías y un documento técnico. El libro blanco identifica ocho recomendaciones clave basadas en la experiencia de los miembros del grupo de trabajo, las tendencias dentro de la investigación actual y el espíritu empresarial, y las instrucciones que están investigando las ECI. Las recomendaciones son:

1. La promoción de la investigación continuada en acuaponía.
2. El desarrollo de incentivos financieros para permitir la comercialización de la acuaponía.
3. La promoción de la acuaponía como empresa social en áreas urbanas.
4. La promoción de la acuaponía en el mundo en desarrollo y en los campos de refugiados.
5. El desarrollo de la legislación acuapónica a nivel de la UE y la orientación para la planificación.
6. El desarrollo de cursos de formación en acuaponía para proporcionar la mano de obra cualificada necesaria para permitir la expansión de la acuaponía en la UE.
7. El desarrollo de protocolos más estrictos de salud y seguridad, incluido el bienestar de los peces.
8. El establecimiento de una Asociación de Acuaponía de la UE, con el fin

de promover la tecnología acuapónica en la UE y ayudar a la transferencia de conocimiento, y la promoción de estándares de alta producción y producción en la UE (Fig. 1).

El conocimiento y la experiencia acumulados del grupo son considerables y, por lo tanto, es apropiado aprovechar la oportunidad al final del proyecto COST de 4 años para reunir esto en un libro, que fue propuesto originalmente por Benz Kotzen y Gavin M. Burnell en el comienzo y luego con Simon Goddek y Alyssa Joyce. Tenemos la fortuna de que Springer Nature, particularmente Alexandrine Cheronet, se haya mostrado entusiasmada con esta publicación y que la organización COST haya financiado el libro como acceso abierto para que esté disponible para que cualquier persona lo descargue. Consideramos que es parte de nuestro deber garantizar que tantas personas como sea posible puedan beneficiarse del conocimiento y la experiencia. El libro es el producto de 68 investigadores y profesionales de 29 países (Australia, Austria, Bélgica, Brasil, Croacia, República Checa, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Israel, Italia, Malta, Países Bajos, Macedonia del Norte, Noruega, Portugal, Serbia, Eslovenia, Sudáfrica, España, Suecia, Suiza, Turquía, el Reino Unido y los Estados Unidos). Al preguntar a los miembros de nuestra Acción COST, así como a los expertos externos si estaban dispuestos a contribuir a este libro, la respuesta fue abrumadora. Poner un libro junto con 24 capítulos dentro de 1 año no hubiera sido posible sin el espíritu de cooperación de cada autor principal y coautor. El libro es un testimonio de su conocimiento y entusiasmo. Ofrecemos nuestro más sincero agradecimiento a nuestro comité de revisión científica que incluye Ranka Junge (acuaponía y educación), Lidia Robaina (alimento para peces), Ragnheidur Thorarinsdottir (acuaponía comercial), Harry Palm (acuaponía y sistemas de acuicultura), Morris Villarroel (bienestar), Haissam Jijakli (fitopatología), Amit Gross (acuicultura y reciclaje), Dieter Anseeuw (hidroponía) y

Figura 1.
Imagen del grupo COST en Murcia, España, 2017

Charlie Shultz (acuaponía). También nos gustaría agradecer a todos los revisores de los 24 capítulos que mejoraron el contenido de los capítulos. Finalmente, y aún más importante, a los editores también les gustaría agradecer a sus familias y socios que han sido pacientes en la edición de un libro grande como este.

Wageningen, Países Bajos — Simon Goddek
Gotemburgo, Suecia — Alyssa Joyce
Londres, Reino Unido — Benz Kotzen
Cork, Irlanda — Gavin M. Burnell

Febrero de 2019

EXPRESIONES DE GRATITUD

Los editores, autores y editores desean agradecer a la organización COST (Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología) (https://www.cost.eu) inicialmente por su financiamiento y apoyo a la Acción 1305 de 4 años de COST, 'The EU Aquaponics Hub - Realización de la Producción Integrada Sostenible de Pescado y Vegetales para la UE ', que fue concebida y presidida por Benz Kotzen, de la Universidad de Greenwich, y luego finalmente por aportar fondos a esta publicación, por lo que es de código abierto y disponible para que todos la puedan leer. Sin COST, que reunió a casi todos los autores en un proyecto sorprendente, este libro no se habría escrito, y sin su contribución final de difusión, este libro no estaría disponible para todos. También reconocemos y apreciamos enormemente el apoyo de Desertfoods International GmbH (www.desertfoods-international.com) y Developonics asbl (www.developonics.com) por el apoyo financiero adicional requerido para permitir que la publicación sea de código abierto. Además, aplaudimos el esfuerzo y la gran habilidad de Aquaponik Manufaktur GmbH (www.aquaponikmanufaktur.de) para producir un conjunto cohesivo y atractivo de ilustraciones para el libro, la Organización de los Países Bajos para la Investigación Científica (NWO; número de proyecto 438-17-402) por apoyar a Simon Goddek en su trabajo editorial y escrito, y la beca FORMAS del Consejo de Investigación Sueco 2017-00242 por apoyar de manera similar a Alyssa Joyce mientras ella realizaba trabajos editoriales y escribía sobre este libro. Finalmente, los editores están en deuda con el entusiasmo y la diligencia de sus autores, especialmente de los 22 autores principales de los 24 capítulos en sus esfuerzos para lograr que este extraordinario libro se entregue a tiempo. ¡Un sincero bien hecho todos y cada uno!.

Wageningen University, Wageningen, The Netherlands — Simon Goddek
University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden — Alyssa Joyce
University of Greenwich, London, UK — Benz Kotzen
University College Cork, Cork, Ireland — Gavin M. Burnell

ACERCA DE LOS EDITORES

SIMON GODDEK

Simon es un experto en el campo de los sistemas acuapónicos de múltiples bucles y un ecopreneur.

En 2014, Simon comenzó su doctorado en la facultad de ingeniería ambiental en la Universidad de Islandia, completándolo en el grupo de Química y Tecnología de base biológica en la Universidad de Wageningen e Investigación (Países Bajos). En el momento de su publicación, es un postdoctorado en el grupo de Métodos matemáticos y estadísticos (Biometris), donde participa en varios proyectos en Europa (es decir, CITYFOOD) y África (por ejemplo, desertfoods Namibia). Su enfoque de investigación en acuaponía incluye simulación y modelado de sistemas numéricos, sistemas de acuaponía desacoplado de múltiples bucles y soluciones de mineralización anaeróbica.

ALYSSA JOYCE

Alyssa es profesora asistente en el Departamento de Ciencias Marinas (acuicultura) en la Universidad de Gotemburgo, Suecia. En su grupo, varios investigadores se centran en el papel de las relaciones bacterianas en la biodisponibilidad de nutrientes y el control de patógenos en los sistemas acuapónicos. Fue una de las representantes suecas en la red COST de la UE sobre acuaponia y es socia del proyecto CITYFOOD que desarrolla tecnología de acuaponia en entornos urbanos.

ACERCA DE LOS EDITORES

BENZ KOTZEN

Benz es profesor asociado y jefe de Investigación y Empresa en la Escuela de Diseño de la Universidad de Greenwich, Londres, y arquitecto paisajista consultor. Dirige el laboratorio de aquaponics en la azotea de la universidad. Desarrolló y presidió el EU Aquaponics Hub, cuyo cometido era elevar el estado del arte de la acuaponía en la UE y facilitar la investigación colaborativa sobre la acuaponía. La agricultura urbana, incluidos los sistemas acuapónicos verticales y el cultivo de hortalizas exóticas acuícolas y la restauración de tierras secas, son campos de investigación clave.

GAVIN M. BURNELL

Gavin es profesor emérito del Centro de Desarrollo de Acuicultura y Pesca, Universidad de Cork, Irlanda, y presidente de la Sociedad Europea de Acuicultura (2018-2020). Ha estado investigando y promoviendo el concepto de acuaponía marina como una contribución a la economía circular y considera que esta tecnología tiene un papel importante en el alcance de las comunidades urbanas. Como cofundador de AquaTT y editor de Aquaculture International, está entusiasmado con las posibilidades que tiene la acuaponía en investigación, educación y capacitación en diversas disciplinas.

TABLA DE CONTENIDO

PARTE I.
CONDICIONES MARCO EN UN MUNDO DE RECURSOS LIMITADOS 21

Capítulo 1. ACUAPONÍA Y LOS DESAFÍOS DE LOS ALIMENTOS GLOBALES. *Simon Goddek, Alyssa Joyce, Benz Kotzen, and Maria Dos-Santos* 22

Capítulo 2. AQUAPONICOS: CIERRE DEL CICLO EN AGUA LIMITADA, TIERRA Y RECURSOS DE NUTRIENTES. *Alyssa Joyce, Simon Goddek, Benz Kotzen, and Sven Wuertz* 43

Capítulo 3. RECIRCULACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ACUICULTURA *Carlos A. Espinal and Daniel Matulić* 65

Capítulo 4. TECNOLOGÍAS EN HIDROPONÍA 119
Carmelo Maucieri, Carlo Nicoletto, Erik van Os, Dieter Anseeuw, Robin Van Havermaet, and Ranka Junge

PARTE II.
TECNOLOGÍAS ESPECIFICAS EN ACUAPONÍA 161

Capítulo 5. ACUAPONÍA: LO BÁSICO 162
Wilson Lennard and Simon Goddek

Capítulo 6. RELACIONES BACTERIANAS EN ACUAPONÍA: NUEVAS DIRECCIONES DE INVESTIGACIÓN. *Alyssa Joyce, Mike Timmons, Simon Goddek, and Timea Pentz* 205

Capítulo 7. SISTEMAS ACUAPÓNICOS ACOPLADOS 229
Harry W. Palm, Ulrich Knaus, Samuel Appelbaum, Sebastian M. Strauch, and Benz Kotzen

Capítulo 8. SISTEMAS ACUAPÓNICOS DESACOPLADOS 277
Simon Goddek, Alyssa Joyce, Sven Wuertz, Oliver Körner, Ingo Bläser, Michael Reuter, and Karel J. Keesman

Capítulo 9. CICLO DE LOS NUTRIENTES EN LOS SISTEMAS ACUAPÓNICOS. *Mathilde Eck, Oliver Körner, and M. Haïssam Jijakli* 311

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 10. TRATAMIENTOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS PARA ACUAPONÍA. REDUCCIÓN DE LODOS Y MINERALIZACIÓN. *Boris Delaide, Hendrik Monsees, Amit Gross, and Simon Goddek* 333

Capítulo 11. MODELACIÓN DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS *Karel J. Keesman, Oliver Körner, Kai Wagner, Jan Urban, Divas Karimanzira, Thomas Rauschenbach, and Simon Goddek* 359

Capítulo 12. ACUAPONIA: TIPOS Y ENFOQUES ALTERNATIVOS. *Benz Kotzen, Maurício Gustavo Coelho Emerenciano, Navid Moheimani, and Gavin M. Burnell* 398

Parte III.
PERSPECTIVA PARA UN DESARROLLO SUSTENTABLE 436

Capítulo 13. DIETAS PARA PECES EN ACUAPONÍA *Lidia Robaina, Juhani Pirhonen, Elena Mente, Javier Sánchez and Neill Goosen* 437

Capítulo 14. PATÓGENOS DE PLANTAS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL EN ACUAPONÍA *Gilles Stouvenakers, Peter Dapprich, Sebastien Massart and M. Haïssam Jijakli* 464

Capítulo 15. SMARTHOODS: MICROREDES INTEGRADAS DE ACUAPONÍA *Florijn de Graaf and Simon Goddek* 499

Capítulo 16. ACUAPONIA PARA EL ANTROPOCENO: HACIA UNA AGENDA DE 'SOSTENIBILIDAD PRIMERO'. *James Gott, Rolf Morgenstern, and Maja Turnšek* 516

Parte IV.
GESTIÓN Y MARKETING

Capítulo 17. CONOCIMIENTO DE LOS RIESGOS EN LA SALUD DE LOS ANIMALES ACUÁTICOS EN ACUAPONÍA. *Hijran Yavuzcan Yildiz, Vladimir* 571

TABLA DE CONTENIDO

Radosavljevic, Giuliana Parisi, and Aleksandar Cvetkovikj

Capítulo 18. ACUAPONÍA COMERCIAL: UN LARGO CAMINO POR DELANTE *Maja Turnšek, Rolf Morgenstern, Iris Schröter, Marcus Mergenthaler, Silke Hüttel, and Michael Leyer* 595

Capítulo 19. ACUAPONÍA: EL PATITO FEO EN LA REGULACIÓN ORGÁNICA. *Paul Rye Kledal, Bettina König, and Daniel Matulić* 639

Capítulo 20. MARCOS REGULATORIOS PARA LA ACUAPONÍA EN LA UNIÓN EUROPEA. *Tilman Reinhardt, Kyra Hoevenaars, and Alyssa Joyce* 658

Capítulo 21. AQUAPONÍA EN EL ENTORNO CONSTRUIDO. *Gundula Proksch, Alex Ianchenko, and Benz Kotzen* 687

Parte V.
ACUAPONÍA Y EDUCACIÓN. 730

Capítulo 22. ACUAPONÍA COMO HERRAMIENTA DE EDUCACIÓN. *Ranka Junge, Tjasa Griessler Bulc, Dieter Anseeuw, Hijran Yavuzcan Yildiz, and Sarah Milliken* 732

Capítulo 23. ALIMENTOS, SUSTENTABILIDAD Y CONOCIMIENTO DE LA CIENCIA EN UN PAQUETE? OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN EL USO DE ACUAPONíA ENTRE LOS JÓVENES EN LA ESCUELA, UNA PERSPECTIVA DANESA. *Bent Egberg Mikkelsen and Collins Momanyi Bosire* 772

Capítulo 24. ACUAPONÍA Y LA EMPRESA SOCIAL *Sarah Milliken and Henk Stander* 785

1 Parte

CONDICIONES MARCO EN UN MUNDO DE RECURSOS LIMITADOS

Capítulo1

ACUAPONÍA Y LOS DESAFÍOS ALIMENTARIOS MUNDIALES

Simón Goddek, Alyssa Joyce, Benz Kotzen y María Dos-Santos

Capítulo 1.

ACUAPONÍA Y LOS DESAFÍOS ALIMENTARIOS MUNDIALES

Simón Goddek, Alyssa Joyce, Benz Kotzen y María Dos-Santos*

Resumen

A medida que la población mundial crece, las demandas de una mayor producción de alimentos se expanden, y a medida que aumenta la presión sobre recursos como la tierra, el agua y los nutrientes, existe una necesidad urgente de encontrar métodos alternativos, sostenibles y confiables para proporcionar estos alimentos. Las estrategias actuales para suministrar más productos no son ecológicamente racionales ni abordan los problemas de la economía circula, de reducir los desperdicios mientras se cumplen los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la OMS para erradicar el hambre y la pobreza para 2015. La acuaponía, una tecnología que integra la acuicultura y la hidroponía, proporciona parte de la solución. Si bien la acuaponía se ha desarrollado considerablemente durante las últimas décadas, hay una serie de cuestiones clave que aún deben abordarse en su totalidad, incluido el desarrollo de sistemas eficientes en energía con un reciclaje de nutrientes optimizado y controles adecuados de patógenos. También hay un problema clave para lograr la rentabilidad, que incluye cadenas de valor efectivas y una gestión eficiente de la cadena de suministro. La legislación, las licencias y las políticas también son claves para el éxito de la acuaponía futura, al igual que los temas de educación e investigación, que se discuten en este libro.

Palabras clave: Acuaponía; Agricultura; Límites planetarios; Cadena de suministro de alimentos; Fósforo.

S. Goddek (*)
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
e-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
A. Joyce
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden e-mail: alyssa.joyce@gu.se
B. Kotzen
School of Design, University of Greenwich, London, UK. e-mail: b.kotzen@greenwich.ac.uk
M. Dos-Santos
ESCS-IPL, DINÂMIA'CET, ISCTE-Institute University of Lisbon, Lisbon, Portugal e-mail: mjpls@iscte-iul.pt

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_1

1.1. INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos depende de la disponibilidad de recursos, como la tierra, el agua dulce, la energía fósil y los nutrientes (Conijn et al. 2018), y el consumo actual o la degradación de estos recursos excede su tasa de regeneración global (Van Vuuren et al. 2010). El concepto de límites planetarios (Fig. 1.1) apunta a definir los límites ambientales dentro de los cuales la humanidad puede operar de manera segura con respecto a los recursos escasos (Rockström et al. 2009). Los límites del flujo bioquímico que limitan el suministro de alimentos son más estrictos que el cambio climático (Steffen et al. 2015). Además del reciclaje de nutrientes, los cambios en la dieta y la prevención de desechos son integralmente necesarios para transformar la producción actual (Conijn et al. 2018; Kahiluoto et al. 2014). Por lo tanto, un desafío global importante es cambiar el modelo económico basado en el crecimiento hacia un paradigma eco económico

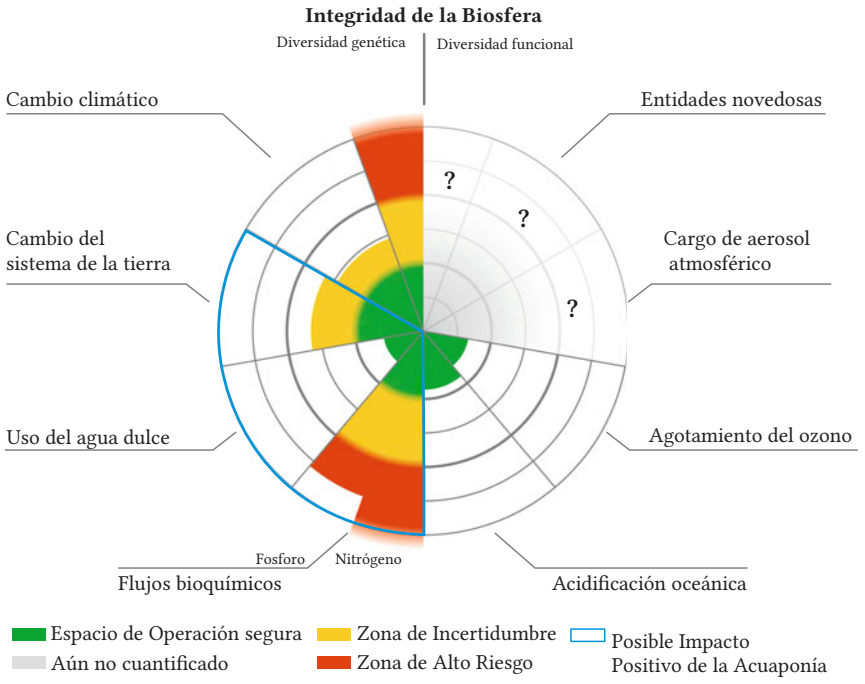


Fig. 1.1. Estado actual de las variables de control para siete de los límites planetarios según lo descrito por Steffen *et al.* (2015). La zona verde es el espacio operativo seguro, el amarillo representa la zona de incertidumbre (riesgo creciente), el rojo es una zona de alto riesgo y los límites de la zona gris son aquellos que aún no se han cuantificado. Las variables delineadas en azul (es decir, cambio en el sistema terrestre, uso de agua dulce y flujos bioquímicos) indican los límites planetarios en los que la acuaponía puede tener un impacto positivo en el corto, mediano y largo plazo.

equilibrado que reemplaza el crecimiento infinito con el desarrollo sostenible (Manelli 2016). Para mantener un paradigma equilibrado, se requieren sistemas de cultivo innovadores y más ecológicos, de modo que las compensaciones entre las necesidades humanas inmediatas puedan equilibrarse al tiempo que se mantiene la capacidad de la biosfera para proporcionar los bienes y servicios necesarios (Ehrlich y Harte 2015). En este contexto, la acuaponía ha sido identificada como un enfoque agrícola que, a través del reciclaje de nutrientes y desechos, puede ayudar a abordar los límites planetarios (Fig. 1.1) y los objetivos de desarrollo sostenible, en particular para regiones áridas o áreas con suelos no navegables (Goddek y Körner 2019; Appelbaum y Kotzen 2016; Kotzen y Appelbaum 2010). La acuaponía también se propone como una solución para el uso de tierras marginales en áreas urbanas para la producción de alimentos más cerca de los mercados, en un momento en gran parte una tecnología de patio trasero (Bernstein 2011). La acuaponía ahora está creciendo rápidamente en la producción a escala industrial, ya que las mejoras técnicas en el diseño y la práctica permiten un aumento significativo de las capacidades y las eficiencias de producción. Una de estas áreas de evolución se encuentra en el campo de los sistemas acuapónicos acoplados y desacoplados. Los diseños tradicionales para sistemas acuapónicos de un solo ciclo comprenden tanto unidades acuícolas como hidropónicas entre las cuales el agua recircula. En tales sistemas tradicionales, es necesario comprometerse con las condiciones de ambos subsistemas en términos de pH, temperatura y concentraciones de nutrientes (Goddek et al. 2015; Kloas et al. 2015) (ver Capítulo 7). Sin embargo, un sistema acuapónico desacoplado puede reducir la necesidad de compensaciones al separar los componentes, permitiendo así optimizar las condiciones en cada subsistema. La utilización de biodigestores de lodos es otra forma clave de maximizar la eficiencia a través de la reutilización de desechos sólidos (Emerenciano et al. 2017; Goddek et al. 2018; Monsees et al. 2015). Aunque muchas de las instalaciones más grandes del mundo todavía se encuentran en regiones áridas (es decir, la Península Arábiga, Australia y el África subsahariana), esta tecnología también se está adoptando en otros lugares, ya que los avances en el diseño han hecho que la acuaponía no solo sea una empresa que ahorra agua, sino también una empresa eficiente, sistema de reciclaje de energía y nutrientes.

1.2. OFERTA Y DEMANDA

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible enfatiza la necesidad de enfrentar los desafíos globales, que van desde el cambio climático hasta la pobreza, con una producción sostenible de alimentos de alta prioridad (Brandi 2017; UN 2017). Como se refleja en el Objetivo 2 de Desarrollo

Sostenible de las Naciones Unidas (UN 2017), uno de los mayores desafíos que enfrenta el mundo es cómo garantizar que una creciente población mundial, que se proyecta aumente a unos 10 mil millones para 2050, pueda satisfacer sus necesidades nutricionales. Para alimentar a otros dos mil millones de personas para 2050, la producción de alimentos deberá aumentar en un 50% a nivel mundial (FAO 2017). Si bien será necesario producir más alimentos, la fuerza laboral rural se está reduciendo debido a la creciente urbanización (dos Santos 2016). La población rural mundial ha disminuido del 66,4% al 46,1% en el período comprendido entre 1960 y 2015 (FAO 2017). Si bien, en 2017, las poblaciones urbanas representaron más del 54% de la población mundial total, casi todo el crecimiento futuro de la población mundial se producirá en zonas urbanas.

De manera que para el 2050, el 66% de la población mundial vivirá en ciudades (ONU 2014). Esta creciente urbanización de las ciudades está acompañada por una red de sistemas de infraestructura, incluidas las redes de transporte que crece simultáneamente.

Para garantizar la seguridad alimentaria mundial, la producción total de alimentos tendrá que aumentar más del 70% en las próximas décadas para cumplir con los Objetivos de Desarrollo del Milenio (FAO 2009), que incluye la "erradicación de la pobreza extrema y el hambre" y también "Asegurar la sostenibilidad del medio ambiente". Al mismo tiempo, la producción de alimentos enfrentará inevitablemente otros desafíos, como el cambio climático, la contaminación, la pérdida de biodiversidad, la pérdida de polinizadores y la degradación de las tierras cultivadas. Estas condiciones requieren la adopción de avances tecnológicos rápidos, métodos de producción más eficientes y sostenibles, y también cadenas de suministro de alimentos más eficientes y sostenibles, dado que aproximadamente mil millones de personas ya padecen desnutrición crónica, mientras que los sistemas agrícolas continúan degradando la tierra, el agua y la biodiversidad a escala global (Foley et al. 2011; Godfray et al. 2010).

Estudios recientes muestran que las tendencias actuales en las mejoras del rendimiento agrícola no serán suficientes para satisfacer la demanda mundial de alimentos proyectada para 2050, y esto sugiere que será necesaria una expansión de las áreas agrícolas (Bajželj et al. 2014). Sin embargo, la degradación generalizada de la tierra en conjunto con otros problemas ambientales parece hacer esto imposible. Actualmente, las tierras agrícolas cubren más de un tercio de la superficie terrestre del mundo, pero menos de un tercio de ellas son cultivables (aproximadamente el 10%) (Banco Mundial 2018). En las últimas tres décadas, la disponibilidad de tierras agrícolas ha ido disminuyendo lentamente, como lo demues-

tra una disminución de más del 50% desde 1970 hasta 2013. Los efectos de la pérdida de tierras cultivables no pueden remediarse convirtiendo las áreas naturales en tierras de labranza muy a menudo resulta en la erosión, así como la pérdida de hábitat. El arado da como resultado la pérdida de la capa superficial del suelo a través de la erosión del viento y el agua, lo que reduce la fertilidad del suelo, aumenta el uso de fertilizantes y eventualmente la degradación de la tierra. Las pérdidas de tierra pueden terminar en estanques, represas, lagos y ríos, causando daños a estos hábitats.

En resumen, la población mundial está creciendo rápidamente, se está urbanizando y se está haciendo más rica. En consecuencia, los patrones dietéticos también están cambiando, lo que crea una mayor demanda de alimentos intensivos en gases de efecto invernadero (GEI), como la carne y los productos lácteos, con los requisitos de tierras y recursos (Garnett 2011). Pero mientras el consumo global está creciendo, los recursos disponibles del mundo, es decir, la tierra, el agua y los minerales, siguen siendo finitos (Garnett, 2011). Sin embargo, al analizar el análisis del ciclo de vida completo de diferentes productos alimenticios, tanto Weber como Matthews (2008) y Engelhaupt (2008) sugieren que los cambios en la dieta pueden ser un medio más eficaz, para reducir la huella climática relacionada con los alimentos de un hogar promedio que "comprando local". Por lo tanto, en lugar de considerar la reducción de las cadenas de suministro, se ha argumentado que un cambio en la dieta de la carne y los productos lácteos a una agricultura orientada a la nutrición, puede ser más eficaz para reducir la energía y las huellas (Engelhaupt 2008; Garnett 2011).

La complejidad de los desequilibrios entre la oferta y la demanda se ve agravada por el deterioro de las condiciones ambientales, lo que hace que la producción de alimentos sea cada vez más difícil y / o impredecible en muchas regiones del mundo. Las prácticas agrícolas no solo pueden socavar los límites planetarios (Fig. 1.1), sino también agravar la persistencia, y la propagación de enfermedades zoonóticas y otros riesgos para la salud (Garnett 2011). Todos estos factores hacen que el sistema alimentario global pierda su capacidad de recuperación y se vuelva cada vez más inestable (Suweis et al. 2015).

La ambiciosa fecha límite para 2015 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de la OMS. (ODM) para erradicar el hambre y la pobreza, para mejorar la salud y asegurar que la sostenibilidad ambiental haya pasado, ha quedado claro que proporcionar alimentos nutritivos para las personas subnutridas y también para las poblaciones afluentes no es una tarea sencilla. En resumen, los cambios en el clima, la pérdida de tierra y la disminución de la calidad de la tierra, las cadenas alimentarias cada vez

más complejas, el crecimiento urbano, la contaminación y otras condiciones ambientales adversas dictan que existe una necesidad urgente no solo de encontrar nuevas formas de cultivar alimentos nutritivos económicamente, sino también ubicar las instalaciones de producción de alimentos más cerca de los consumidores. Cumplir con los ODM requerirá cambios en la práctica, como reducir los desechos, el carbono y las huellas ecológicas, y la acuaponía es una de las soluciones que tiene el potencial de cumplir estos objetivos.

1.3. DESAFÍOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS EN ACUAPONÍA

Si bien la acuaponía es una de las tecnologías clave de producción de alimentos que "Podría cambiar nuestras vidas" (van Woensel et al. 2015), en términos de producción de alimentos sostenible y eficiente, la acuaponía se puede simplificar y volverse aún más eficiente. Uno de los problemas clave en los sistemas acuapónicos convencionales es que los nutrientes en los efluentes producidos por los peces son diferentes de la solución óptima de nutrientes para las plantas. Los sistemas acuapónicos desacoplados (DAPS), que utilizan agua de los peces pero no devuelven el agua al pez después de las plantas, pueden mejorar los diseños tradicionales al introducir componentes de mineralización y biorreactores de lodo que contienen microorganismos que convierten la materia orgánica en formas biodisponibles de minerales clave, especialmente fósforo, magnesio, hierro, manganeso y azufre, que son deficientes en los efluentes típicos de los peces. Al contrario de los componentes de mineralización en sistemas de un solo ciclo, el efluente del biorreactor en DAPS solo se alimenta al componente de la planta en lugar de diluirse en todo el sistema. Por lo tanto, los sistemas desacoplados que utilizan digestores de lodo permiten optimizar el reciclaje de desechos orgánicos de los peces como nutrientes para el crecimiento de las plantas (Goddek 2017; Goddek et al. 2018). Los desechos en tales sistemas comprenden principalmente lodos de peces (es decir, heces y alimentos no consumidos que no están en solución) y, por lo tanto, no pueden suministrarse directamente en un sistema hidropónico. Los biorreactores (ver el Capítulo 10) son por lo tanto, un componente importante que puede convertir lodos inutilizables en fertilizantes hidropónicos o reutilizar desechos orgánicos como los tallos y raíces del componente de producción de plantas en biogás para la generación de calor y electricidad o diseños de DAPS que también proporcionan un control independiente, ciclo del agua para cada unidad, lo que permite la separación de los sistemas (RAS, hidropónicos y digestores) según se requiera para el control de los flujos de nutrientes. El agua se mueve entre los componentes en un circuito de conservación de energía y nutrientes, por lo que las cargas y flujos de nutrientes en cada subsistema se pueden

monitorear y regular para cumplir mejor con los requisitos posteriores.

Por ejemplo, el fósforo (P) es un fósil esencial pero agotable, el recurso que se extrae para obtener fertilizante, pero los suministros mundiales se están agotando a un ritmo alarmante. El uso de digestores en sistemas acuapónicos desacoplados permite que los microorganismos conviertan los desechos de peces en fósforo en ortofosfatos que pueden ser utilizados por las plantas, con altas tasas de recuperación (Goddek et al. 2016, 2018).

Aunque los sistemas desacoplados son muy efectivos en la recuperación de nutrientes, con una pérdida de nutrientes cercana a cero, la escala de producción en cada una de las unidades es importante, dado que los flujos de nutrientes de una parte del sistema deben combinarse con el potencial de producción posterior de otros componentes. El software de modelado y los sistemas de adquisición de datos de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADAS), por lo tanto, son importantes para analizar e informar el flujo, las dimensiones, los balances de masa y las tolerancias de cada unidad, lo que hace posible predecir parámetros físicos y económicos (por ejemplo, cargas de nutrientes, peces óptimos). - Plantación de pares, tasas de flujo y costos para mantener parámetros ambientales específicos. En el cap. 11, analizaremos con más detalle la teoría de sistemas aplicada a los sistemas acuapónicos y demostraremos cómo el modelado puede resolver algunos de los problemas de escala, mientras que las soluciones tecnológicas innovadoras pueden aumentar la eficiencia y, por lo tanto, la rentabilidad de dichos sistemas. La escala es importante no solo para predecir la viabilidad económica sino también para predecir los resultados de producción en función de las proporciones de nutrientes disponibles.

Otro tema importante, que requiere un mayor desarrollo, es el uso y la reutilización de la energía. Los sistemas acuapónicos son intensivos en energía e infraestructura. Dependiendo de la radiación solar recibida, el uso de la energía solar fotovoltaica, las fuentes de calor solar térmica y la desalinización (solar) pueden no ser económicamente viables, pero podrían estar potencialmente integradas en sistemas acuapónicos. En el cap. 12, presentamos información sobre posibilidades técnicas y operativas innovadoras que tienen la capacidad de superar las limitaciones inherentes de dichos sistemas, incluidas nuevas y emocionantes oportunidades para implementar sistemas acuapónicos en áreas áridas.

En el cap. 2, también discutimos con más detalle el rango de desafíos ambientales que la acuaponía puede ayudar a resolver. El control de patógenos, por ejemplo, es muy importante, y los sistemas RAS contenidos

tienen una serie de ventajas medioambientales para la producción de peces, y una de las ventajas de los sistemas aquaponicos desacoplados es la capacidad de hacer circular agua entre los componentes y utilizar controles independientes en los que más fácil de detectar, aislar y descontaminar unidades individuales cuando existen amenazas de patógenos. Los probióticos que son benéficos para el cultivo de peces también parecen ser beneficiosos para la producción de plantas y pueden aumentar la eficiencia de la producción cuando circulan dentro de un sistema cerrado (Sirakov et al. 2016). Tales desafíos se exploran más a fondo en el cap. 5, donde discutimos con más detalle cómo la innovación en acuaponía puede resultar en:

(a) una mayor eficiencia en el uso del espacio (menos costos y materiales, maximizando el uso de la tierra).
(b) recursos de entrada reducidos, por ejemplo, harina de pescado y salidas negativas reducidas, p. ej. descarga de residuos.
(c) uso reducido de antibióticos y pesticidas en sistemas auto contenidos.

Todavía hay varias áreas temáticas acuapónicas que requieren más investigación para explotar todo el potencial de estos sistemas. Desde una perspectiva científica, temas como el ciclo del nitrógeno **(Cap. 9)**, la remineralización aeróbica y anaeróbica **(Cap. 10)**, la eficiencia del agua y los nutrientes **(Cap. 8)**, las dietas de peces acuapónicos optimizadas **(Cap. 13)** y los patógenos de plantas y el control. Las estrategias **(Cap. 14)** son todas de alta prioridad.

En resumen, los siguientes desafíos científicos y tecnológicos deben ser abordados:

1. Nutrientes: como hemos discutido, los sistemas que utilizan biodigestores de lodos permiten optimizar el reciclaje de desechos orgánicos del pez en nutrientes para el crecimiento de las plantas, tales diseños permiten la recuperación y el reciclaje optimizados de nutrientes para crear una pérdida de nutrientes casi nula en el sistema.
2. Agua: la reutilización del agua agotada en nutrientes de los sistemas también se puede optimizar para reutilizarla en el componente de los peces utilizando condensadores.
3. Energía: los diseños con energía solar también mejoran el ahorro de energía, especialmente si el agua precalentada de los calentadores solares en los sistemas se puede recircular de nuevo a los tanques de peces para su reutilización.

La capacidad de reciclar agua, nutrientes y energía hace que la acuaponía sea una solución potencialmente única para una serie de problemas

ambientales que enfrenta la agricultura convencional. Esto se discute en el cap. 2.

1.4. RETOS ECONÓMICOS Y SOCIALES.

Desde una perspectiva económica, hay una serie de limitaciones inherentes a los sistemas acuapónicos que hacen que los diseños comerciales específicos sean más o menos viables (Goddek et al. 2015; Vermeulen y Kamstra 2013). Una de las cuestiones clave es que los sistemas independientes de hidroponía y acuicultura son más productivos que los sistemas acuapónicos tradicionales de un solo ciclo (Graber y Junge 2009), ya que no requieren intercambios entre los componentes de los peces y las plantas. La acuaponía clásica tradicional de un solo lazo requiere un compromiso entre los componentes de los peces y las plantas cuando se intenta optimizar la calidad del agua y los niveles de nutrientes que difieren inherentemente para las dos partes (por ejemplo, los rangos de pH deseados y los requisitos y concentraciones de nutrientes). En los sistemas acuapónicos tradicionales, los ahorros en los requisitos de fertilizantes para las plantas no compensan los déficits de cosecha causados por condiciones subóptimas en los subsistemas respectivos (Delaide et al. 2016).

La optimización de las condiciones de crecimiento para ambas plantas (Delaide et al. 2016; Goddek y Vermeulen 2018) y los peces es el mayor desafío para la rentabilidad, y los resultados actuales indican que esto se puede lograr mejor en sistemas acuapónicos desacoplados de múltiples bucles porque se basan en sistemas independientes. ciclos de recirculación que involucran (1) peces, (2) plantas y (3) biorreactores (anaeróbicos o aeróbicos) para la digestión de lodos y un flujo de agua (nutriente) unidireccional, que puede mejorar la recuperación de macro y micro nutrientes y la biodisponibilidad, así como optimización del consumo de agua (Goddek y Keesman 2018). Los estudios actuales muestran que este tipo de sistema permite el mantenimiento de poblaciones específicas de microorganismos dentro de cada compartimento para un mejor manejo de la enfermedad, y son más eficientes económicamente en la medida en que los sistemas no solo reducen la salida de desechos, sino que también reutilizan el lodo inutilizable, convirtiéndolo a resultados valiosos (por ejemplo, biogás y fertilizantes).

Los sistemas de RAS independientes y las unidades de hidroponía también tienen una amplia gama de desafíos operativos que se discuten en detalle en los capítulos. 3 y 4. Cada vez más, los avances tecnológicos han permitido índices de productividad más altos (Fig. 1.2), que pueden definirse como una fracción de las salidas del sistema (es decir, peces y plantas) sobre la

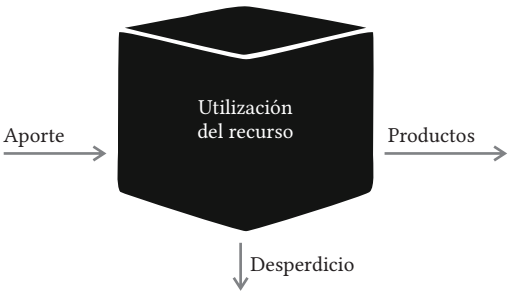


Fig. 1.2 Un sistema de acuaponía visto como un esquema de caja negra. No podemos ver dentro de la caja, pero conocemos las entradas, las salidas (es decir, los peces y las plantas) y los residuos.

entrada del sistema (es decir, alimentación de peces y / o fertilización adicional), entrada de energía para iluminación, calefacción y bombeo de dosificación de CO_2 y biocontrol).

Al considerar los muchos desafíos que enfrenta la acuaponía, la producción, los problemas se pueden dividir en tres temas específicos:

1. Productividad del sistema.
2. Cadenas de valor efectivas.
3. Gestión eficiente de la cadena de suministro.

Productividad del sistema: La productividad agrícola se mide como la relación entre los productos agrícolas y los insumos agrícolas. Los sistemas acuapónicos tradicionales a pequeña escala fueron diseñados principalmente para abordar consideraciones ambientales como la descarga de agua, los insumos de agua y el reciclaje de nutrientes, pero el enfoque en los últimos años se ha orientado cada vez más hacia la viabilidad económica para aumentar la productividad para aplicaciones agrícolas a gran escala. Sin embargo, esto requerirá que la productividad de los sistemas acuapónicos sea capaz de competir económicamente con los sistemas hidropónicos y de acuicultura independientes e innovadores. Si el concepto de acuaponía se va a aplicar con éxito a gran escala, se debe optimizar la reutilización de nutrientes y energía, pero también se deben considerar los mercados finales.

Cadenas de valor efectivas: Las cadenas de valor (valor agregado) de los productos agrícolas surgen principalmente del procesamiento del producto, como las hortalizas cosechadas, las frutas y los peces. Por ejemplo, el precio de venta del pesto (es decir, rojo y verde) puede ser más de diez veces superior al de los tomates, albahaca, aceite de oliva y piñones. Además, la mayoría de los productos alimenticios procesados tienen una vida útil más larga, lo que reduce el deterioro. Evidentemente, los productos frescos son importantes porque los valores nutricionales son en su mayoría más altos

que los de los alimentos procesados. Sin embargo, producir productos frescos y de alta calidad es un verdadero desafío y, por lo tanto, un lujo en muchas regiones del mundo. Las pérdidas de nutrientes durante el almacenamiento de frutas y verduras son sustanciales si no se enlatan o se congelan rápidamente (Barrett 2007; Rickman et al. 2007). Por lo tanto, para sistemas a gran escala, se debe considerar al menos el procesamiento de alimentos para equilibrar cualquier fluctuación entre la oferta y la demanda y reducir el desperdicio de alimentos. Con respecto a la reducción del desperdicio de alimentos, las hortalizas que no cumplen con los estándares de productos frescos, pero que aún son de calidad comercial, deben procesarse para reducir las pérdidas poscosecha.

Si bien estos criterios se aplican a todos los productos agrícolas y de pesca, el valor agregado puede aumentar sustancialmente la rentabilidad de la granja de acuaponía, especialmente si los productos pueden alcanzar mercados específicos.

Gestión eficiente de la cadena de suministro: En países con redes de transporte y refrigeración bien desarrolladas, se pueden importar frutas y verduras de todo el mundo para satisfacer las demandas de los consumidores de productos frescos. Pero como se mencionó anteriormente, los productos frescos y de alta calidad son un bien escaso en muchas partes del mundo, y el movimiento de mercancías a larga distancia, es decir, la gestión de la cadena de suministro.- para satisfacer la demanda de los consumidores de alto nivel a menudo es criticado y justificadamente. La mayoría de los habitantes urbanos de todo el mundo confían en el transporte de alimentos a largas distancias para satisfacer sus necesidades diarias (Grewal y Grewal 2012). Una de las principales críticas es, por lo tanto, la dependencia de los combustibles fósiles necesarios para el transporte de productos a grandes distancias (Barrett 2007). El tema de las millas de alimentos se centra en la distancia a la que se transportan los alimentos desde el momento de la producción hasta la compra por parte del consumidor final (Mundler y Criner 2016). Sin embargo, en términos de emisiones de CO2 por tonelada / km (tkm), una milla de alimentos para el transporte ferroviario (13,9 g de CO2 / tkm) no es igual a una milla de alimentos de transporte de camiones / carreteras, ya que el transporte de camiones tiene más de 15 veces más impacto ambiental (McKinnon 2007). Por lo tanto, la distancia de transporte no es necesariamente la única consideración, ya que la huella ecológica de los vegetales cultivados en granjas en áreas rurales es potencialmente menor que los insumos necesarios para cultivar alimentos en invernaderos más cercanos a los centros urbanos.

Las millas de comida son solo una parte de la imagen. Los alimentos se

transportan largas distancias, pero las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de alimentos están dominadas por la fase de producción (es decir, el impacto de la energía para calefacción, refrigeración e iluminación) (Engelhaupt 2008; Weber y Matthews 2008). Por ejemplo, Carlsson (1997) mostró que los tomates importados de España a Suecia en invierno tienen una huella de carbono mucho menor que los cultivados localmente en Suecia, ya que los insumos de energía para invernaderos en Suecia superan con creces la huella de carbono del transporte desde España. Al adquirir alimentos, el transporte de mercancías no es el único factor a tener en cuenta, ya que la frescura de los productos determina su valor nutritivo, su sabor y su atractivo general para los consumidores. Al cultivar alimentos frescos a nivel local, muchos académicos están de acuerdo en que la agricultura urbana podría ayudar a asegurar el suministro de productos de alta calidad para las poblaciones urbanas del futuro, al tiempo que reduce las millas de alimentos (Bon et al. 2010; dos Santos 2016; Hui 2011). Ambas áreas serán discutidas en más detalle en la Secta. 1.5.

Desde la perspectiva del consumidor, la acuaponía urbana tiene ventajas debido a sus beneficios ambientales debido a las cadenas de suministro cortas y, dado que cumple con las preferencias de los consumidores por alimentos frescos producidos localmente de alta calidad (Miličić et al. 2017). Sin embargo, a pesar de estas ventajas, hay una serie de preocupaciones socioeconómicas: el principal problema está relacionado con los precios de las propiedades urbanas, ya que la tierra es cara y, a menudo, se considera demasiado valiosa para la producción de alimentos. Por lo tanto, la compra de terrenos urbanos muy probablemente hace que sea imposible lograr un retorno de inversión esperado factible. Sin embargo, en ciudades cada vez más reducidas, donde las poblaciones están disminuyendo, el espacio no utilizado podría usarse con fines agrícolas (Bontje y Latten 2005; Schilling y Logan 2008) como es el caso en Detroit en los Estados Unidos (Mogk et al. 2010).

Además, hay un problema importante de los controles de planificación urbana, donde en muchas ciudades las tierras urbanas no están diseñadas para la producción agrícola de alimentos y se considera que la acuaponía es parte de la agricultura. Por lo tanto, en algunas ciudades no se permite la acuicultura. Ha llegado el momento de comprometerse con los planificadores urbanos que necesitan estar convencidos de los beneficios de las granjas urbanas, que son altamente productivas y producen alimentos frescos, saludables y locales en medio del desarrollo urbano y suburbano.

1.5. EL FUTURO DE LA ACUAPONÍA

La tecnología ha permitido que la productividad agrícola crezca exponencialmente en el último siglo, lo que también apoya un crecimiento significativo de la población. Sin embargo, estos cambios también pueden socavar la capacidad de los ecosistemas para sostener la producción de alimentos, mantener los recursos forestales, y de agua dulce, y ayudar a regular el clima y la calidad del aire (Foley et al. 2005).

Uno de los desafíos más apremiantes en la producción de alimentos innovadores, y por lo tanto en la acuaponía, es abordar los problemas regulatorios que limitan la expansión de las tecnologías integradas. Una amplia gama de agencias diferentes tiene jurisdicción sobre el agua, la salud animal, la protección del medio ambiente y la seguridad alimentaria, y sus regulaciones en algunos casos son contradictorias o no son adecuadas para sistemas integrados complejos (Joly et al. 2015). Las regulaciones y la legislación son actualmente una de las áreas más confusas para los productores y los posibles empresarios. Los productores e inversionistas necesitan estándares y pautas para obtener permisos, préstamos y exenciones de impuestos, sin embargo, la confusa superposición de responsabilidades entre las agencias reguladoras destaca la necesidad urgente de una mejor armonización y definiciones consistentes. Los marcos regulatorios son a menudo confusos, y las licencias agrícolas, así como la certificación del consumidor, siguen siendo problemáticas en muchos países. La FAO (en 2015), la OMS (en 2017) y la UE (en 2016) empezaron recientemente a armonizar las disposiciones sobre sanidad animal / bienestar e inocuidad de los alimentos dentro de los sistemas acuapónicos y para el comercio de importación y exportación de productos acuapónicos. Por ejemplo, varios países que participan en la acuaponía están presionando para que se formulen palabras explícitas en el Codex Alimentarius, y un enfoque clave dentro de la UE, determinado por la Acción COST FA1305 patrocinada por la UE, el 'Centro de la acuicultura de la UE', se encuentra actualmente en la definición de la acuaponía como una clara y entidad distinta. En la actualidad, las regulaciones definen la producción tanto para la acuicultura como para la hidroponía, pero no tienen disposiciones para la fusión de las dos. Esta situación a menudo crea una burocracia excesiva para los productores que deben licenciar dos operaciones separadas o cuya legislación nacional no permite el co-cultivo (Joly et al. 2015). El EU Aquaponics Hub, que ha apoyado esta publicación (COST FA1305), define la acuaponía como «Un sistema de producción de organismos y plantas acuáticos en el que la mayoría (> 50%) de los nutrientes que sostienen el crecimiento óptimo de la planta se derivan de los desechos que se originan de la alimentación de los organismos acuáticos "(ver Capítulo 7).

Los esquemas de certificación de consumidores también siguen siendo un área difícil para los productores de acuaponía en muchas partes del mundo. Por ejemplo, en los Estados Unidos y Australia, los productos acuapónicos pueden certificarse como orgánicos, pero no dentro de la Unión Europea. Desde una perspectiva económica, la acuaponía en teoría es capaz de aumentar el valor general de la pesca de peces o de la hidroponía convencional, al mismo tiempo que cierra el ciclo de alimentos, agua y energía dentro de una economía circular basada en la biología. Para que los sistemas acuapónicos de pequeña escala sean económicamente viables, los acuaponistas generalmente tienen que operar en nichos de mercado para obtener precios más altos para los productos, por lo que la certificación es muy importante.

Los problemas más apremiantes son si la acuaponía puede llegar a ser aceptable a nivel de política. La seguridad alimentaria es una alta prioridad para obtener apoyo público, y aunque existe un riesgo patógeno mucho menor en los sistemas cerrados, lo que implica una menor necesidad de antimicrobianos y pesticidas, la gestión de riesgos potenciales o, además, la gestión de las percepciones de esos riesgos, especialmente en lo que puedan afectar. Seguridad alimentaria: es una alta prioridad para las autoridades gubernamentales e inversores por igual (Miličić et al. 2017). Una preocupación que se plantea a menudo es el temor a la transferencia de patógenos en los lodos de los peces a las plantas, pero esto no está comprobado en la literatura (cap. 6). Como tal, existe la necesidad de disipar cualquier inquietud de seguridad alimentaria y bioseguridad a través de una investigación cuidadosa y, cuando existan inquietudes, para determinar cómo puede ser posible manejar estos problemas a través de diseños de sistemas mejorados y / o marcos regulatorios.

La acuaponía es una tecnología emergente de producción de alimentos que tiene la capacidad de condensar y comprimir la producción en espacios y lugares que normalmente no se utilizarían para cultivar alimentos. Esto no solo significa que es excepcionalmente relevante en áreas urbanas, donde la acuaponía se puede colocar en lugares subutilizados y no utilizados, como techos planos, sitios de desarrollo, fábricas abandonadas, urbanizaciones y escuelas, sino que proporciona un medio tanto para el trabajo como para el desarrollo del mundo, para que las personas recuperen parte del proceso de producción de alimentos al proporcionar alimentos locales frescos al mercado (van Gorcum et al. 2019). La integración de la acuaponía con la agricultura vertical y las tecnologías de pared viva, con el tiempo, probablemente mejorará la productividad al reducir la huella agrícola general con la reducción de la toma de tierras y la intensificación.

Los intensos métodos de producción en acuaponía se basan en el conocimiento de una combinación de factores clave que son muy adecuados para su uso en la enseñanza de materias de CTIM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas) en las escuelas. La acuaponía ofrece al profesor y al alumno la oportunidad de explorar el ámbito de los sistemas complejos, su diseño y gestión y una gran cantidad de otras áreas temáticas, incluidas las ciencias ambientales, la química del agua, la biología y el bienestar animal. La acuaponía también se usa en centros penitenciarios, como en la cárcel del condado de San Francisco, para ayudar a los reclusos a adquirir habilidades y experiencia en acuicultura y horticultura que pueden usar en su rehabilitación y liberación. En el contexto doméstico, existe una tendencia creciente a diseñar sistemas de mostrador que puedan cultivar hierbas, así como pequeños sistemas que puedan ubicarse en oficinas, donde los peces exóticos proporcionan un efecto calmante, mientras que las plantas, como parte de las paredes vivas, también proporcionan un telón de fondo estético y limpiar el aire.

La acuaponía es una tecnología agrícola que avanza rápidamente desde sus primeras explotaciones en los últimos años del siglo XX y las primeras décadas del siglo XXI. Pero aún es un "tema emergente de tecnología y ciencia" (Junge et al. 2017) que está sujeto a una cantidad considerable de "exageraciones". Al comparar el número de artículos de acuicultura, hidropónicos y acuapónicos revisados por pares acuapónicos, los documentos son considerablemente más bajos (Fig. 1.3), pero las cifras aumentan y seguirán aumentando a medida que la educación acuapónica, especialmente a nivel universitario, y el interés general aumente. Un "índice de exageración" se puede describir como un indicador de la popularidad de un tema en los medios públicos en relación con lo que se publica en la prensa académica. Esto puede, por ejemplo, calcularse tomando los resultados de búsqueda en Google divididos por los resultados de búsqueda en Google Escolar. En el caso de la acuaponía, el coeficiente de exageración en el 16 de agosto de 2016 fue de 1349, lo que es considerable en comparación con las tasas de exageración de hidroponía (131) y recirculación de acuicultura (17) (Junge et al. 2017). La sensación que se tiene de esto es que, de hecho, la acuaponía es una tecnología emergente, pero que existe un enorme interés en el campo, que es probable que continúe y aumente en las próximas décadas. Sin embargo, es probable que la proporción de exageraciones disminuya a medida que se realicen más investigaciones y se publiquen artículos científicos.

Este libro está dirigido al investigador y practicante de acuaponía, y ha sido diseñado para discutir, explorar y revelar los problemas que la acuaponía está abordando ahora y que sin duda surgirán en el futuro. Con un espectro

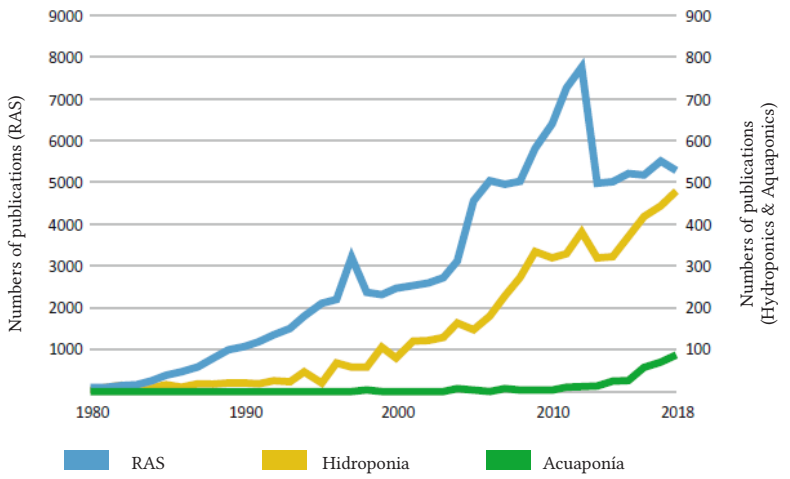


Fig. 1.3 El número de artículos publicados sobre "hidropónicos", "RAS" y "acuapónicos" de 1980 a 2018 (los datos se recopilaron de la base de datos Scopus el 30 de enero de 2019). Tenga en cuenta que la escala para "RAS" es un orden de magnitud superior a la de "hidropónicos" y "acuapónicos"

tan amplio de temas, su objetivo es proporcionar una visión general completa pero fácilmente accesible del campo científico y comercial bastante novedoso de la acuaponía. Además de la producción y el aspecto técnico, este libro ha sido diseñado para abordar las tendencias en el suministro de alimentos y demanda, así como las diversas implicaciones económicas, ambientales y sociales de esta tecnología emergente. El libro ha sido coautor de numerosos expertos de todo el mundo, pero en su mayoría dentro de la UE. Sus 24 capítulos cubren toda la gama de áreas de acuaponía y proporcionarán un libro de texto necesario para todos aquellos interesados en acuaponía y en movimiento hacia la próxima década.

REFERENCIAS

Appelbaum S, Kotzen B (2016) Further investigations of aquaponics using brackish water resources of the Negev desert. Ecocycles 2:26. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.53

Bajželj B, Richards K.S, Allwood J.M, Smith P, Dennis J.S, Curmi E, Gilligan C.A (2014) Importance of food-demand management for climate mitigation. Nat Clim Chang 4:924–929. https://doi. org/10.1038/nclimate2353

Barrett, D.M. (2007) Maximizing the nutritional value of fruits and vegetables

Bernstein S (2011) Aquaponic gardening: a step-by-step guide to raising vegetables and fish together. New Society Publishers, Gabriola Island

Bon H, Parrot L, Moustier P (2010) Sustainable urban agriculture in developing countries. A review. Agron Sustain Dev 30:21–32. https://doi.org/10.1051/agro:2008062

Bontje M, Latten J (2005) Stable size, changing composition: recent migration dynamics of the Dutch large cities. Tijdschr Econ Soc Geogr 96:444–451. https://doi.org/10.1111/j.1467-9663.2005.00475.x

Brandi CA (2017) Sustainability standards and sustainable development –synergies and trade-offs of transnational governance. Sustain Dev 25:25–34. https://doi.org/10.1002/sd.1639

Carlsson A (1997) Greenhouse gas emissions in the life-cycle of carrots and tomatoes. Lund University, Lund

Conijn J.G, Bindraban P.S, Schröder J.J, Jongschaap R.E.E (2018) Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? Agric Ecosyst Environ 251:244–256. https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2017.06.001

Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli M (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water 8:467. https://doi.org/10.3390/w8100467

dos Santos MJPL (2016) Smart cities and urban areas–aquaponics as innovative urban agriculture. Urban For Urban Green 20:402. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.004

Ehrlich PR, Harte J (2015) Opinion: to feed the world in 2050 will require a global revolution. Proc Natl Acad Sci U S A 112:14743–14744. https://doi.org/10.1073/pnas.1519841112

Emerenciano M, Carneiro P, Lapa M, Lapa K, Delaide B, Goddek S (2017) Mineralizacão de sólidos. Aquac Bras:21–26

Engelhaupt E (2008) Do food miles matter? Environ Sci Technol 42:3482

FAO (2009) The state of food and agriculture. FAO, Rome

FAO (2017) 2017 the state of food and agriculture leveraging food systems for inclusive rural transformation. FAO, Rome

Foley J.A, Defries R, Asner G.P, Barford C, Bonan G, Carpenter S.R, Chapin F.S, Coe M.T, Daily G.C, Gibbs H.K, Helkowski J.H, Holloway T, Howard E.A, Kucharik C.J, Monfreda C, Patz J.A, Prentice I.C, Ramankutty N, Snyder PK (2005) Global consequences of land use. Science 309:570–574. https://doi.org/10.1126/science.1111772

Foley J.A, Ramankutty N, Brauman K.A, Cassidy E.S, Gerber J.S, Johnston M, Mueller N.D, O'Connell C, Ray D.K, West P.C, Balzer C, Bennett E.M, Carpenter S.R, Hill J, Monfreda C, Polasky S, Rockström J, Sheehan J, Siebert S, Tilman D, Zaks D.P.M (2011) Solutions for a cultivated planet. Nature 478:337–342. https://doi.org/10.1038/nature10452

Garnett T. (2011) Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? Food Policy 36:S23–S32. https://doi.org/10.1016/J.FOODPOL.2010.10.010

Goddek S (2017) Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems. Wageningen University, Wageningen. https://doi.org/10.18174/412236

Goddek S, Keesman K.J (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024

Goddek S, Vermeulen T. (2018) Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. Aquac Int 26:1377. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199

Goddek S, Schmautz Z, Scott B, Delaide B, Keesman K, Wuertz S, Junge R (2016) The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. Agronomy 6:37. https://doi.org/10.3390/agronomy6020037

Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.07.003

Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143–154. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.010

Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, Pretty J, Robinson S, Thomas SM, Toulmin C (2010) Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science 327:812–818. https://doi.org/10.1126/science.1185383

Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156

Grewal SS, Grewal PS (2012) Can cities become self-reliant in food? Cities 29:1–11. https://doi. org/10.1016/J.CITIES.2011.06.003

Hui SCM (2011) Green roof urban farming for buildings in high-density urban cities. In: World green roof conference. pp 1–9

Joly A, Junge R, Bardocz T (2015) Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions. Ecocycles 1:3–5. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v1i2.30

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli M (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182. https://doi.org/10.3390/w9030182

Kahiluoto H, Kuisma M, Kuokkanen A, Mikkilä M, Linnanen L (2014) Taking planetary nutrient boundaries seriously: can we feed the people? Glob Food Sec 3:16–21. https://doi.org/10.1016/J.GFS.2013.11.002

Kloas W, Groß R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquac Envi- ron Interact 7:179–192. https://doi.org/doi. https://doi.org/10.3354/aei00146

Kotzen B, Appelbaum S (2010) An investigation of aquaponics using brackish

water resources in the Negev desert. J Appl Aquac 22:297–320. https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571
Manelli A. (2016) New paradigms for a sustainable Well-being. Agric Agric Sci Procedia 8:617–627. https://doi.org/10.1016/J.AASPRO.2016.02.084
McKinnon A (2007) CO2 emissions from freight transport: an analysis of UK data. Prepared for the climate change working group of the commission for integrated transport. London, England Miličić V, Thorarinsdottir R, Santos M, Hančič M (2017) Commercial aquaponics approaching the European market: to consumers' perceptions of aquaponics products in Europe. Water 9:80. https://doi.org/10.3390/w9020080
Mogk J, Kwiatkowski S, Weindorf M (2010) Promoting urban agriculture as an alternative land use for vacant properties in the city of Detroit: benefits, problems, and proposals for a regulatory framework for successful land use integration. Law Fac Res Publ 56:1521
Monsees H, Keitel J, Kloas W, Wuertz S (2015) Potential reuse of aquacultural waste for nutrient solutions in aquaponics. In: Proc of Aquaculture Europe. Rotterdam, The Netherlands
Mundler P, Criner G (2016) Food systems: food miles. In: Encyclopedia of food and health. Elsevier, Amsterdam, pp 77–82. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00325-1
Rickman JC, Barrett DM, Bruhn CM (2007) Review nutritional comparison of fresh, frozen and canned fruits and vegetables. Part 1. Vitamins C and B and phenolic compounds. J Sci Food Agric J Sci Food Agric 87:930–944. https://doi.org/10.1002/jsfa.2825
Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin FS, Lambin EF, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, de Wit CA, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder PK, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley JA (2009) A safe operating space for humanity. Nature 461:472–475. https://doi.org/10.1038/461472a
Schilling J, Logan J (2008) Greening the rust belt: a green infrastructure model for right sizing America's shrinking cities. J Am Plan Assoc 74:451–466. https://doi.org/10.1080/01944360802354956
Sirakov I, Lutz M, Graber A, Mathis A, Staykov Y, Smits T, Junge R (2016) Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponic system. Water 8:518. https://doi.org/10.3390/w8110518
Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, de Vries W, de Wit CA, Folke C, Gerten D, Heinke J, Mace GM, Persson LM, Ramanathan V, Reyers B, Sörlin S (2015) Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science 347(80):736
Suweis S, Carr JA, Maritan A, Rinaldo A, D'Odorico P (2015) Resilience and reactivity of global food security. Proc Natl Acad Sci U S A 112:6902–6907. https://doi.org/10.1073/pnas.1507366112

UN (2014) World's population increasingly urban with more than half living in urban areas | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs [WWW Document]. URL http://www.un.org/en/development/desa/news/population/world-urbanization-prospects-2014.html. Accessed 19 Oct 2018

UN (2017) The sustainable development goals report. UN, New York

van Gorcum B, Goddek S, Keesman KJ (2019) Gaining market insights for aquaponically produced vegetables in Kenya. Aquac Int:1–7. https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-019-00379-1

Van Vuuren DP, Bouwman AF, Beusen AHW (2010) Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. Glob Environ Chang 20:428–439. https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2010.04.004

Van Woensel L, Archer G, Panades-Estruch L, Vrscaj D (2015) Ten technologies which could change our lives – potential impacts and policy implications. European Commission, Brussels Vermeulen T, Kamstra A (2013) The need for systems design for robust aquaponic systems in the urban environment

Weber CL, Matthews HS (2008) Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the United States. Environ Sci Technol 42:3508–3513. https://doi.org/10.1021/es702969f

World Bank (2018) Agricultural land (% of land area) [WWW Document]. URL https://data.worldbank.org/indicator/ag.lnd.agri.zs. Accessed19 Oct 2018

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 2

ACUAPONÍA: CERRANDO EL CICLO DE LA LIMITACIÓN DEL AGUA LA TIERRA Y LOS NUTRIENTES

Alyssa Joyce, Simon Goddek,
Benz Kotzen, and Sven Wuertz

Capítulo 2.

ACUAPONÍA: CERRANDO EL CICLO DE LA LIMITACIÓN DEL AGUA LA TIERRA Y LOS NUTRIENTES.

Alyssa Joyce, Simon Goddek, Benz Kotzen, and Sven Wuertz*

Resumen

La hidroponía inicialmente se desarrolló en regiones áridas en respuesta a la escasez de agua dulce, mientras que en áreas con suelo pobre, se vio como una oportunidad para aumentar la productividad con menos uso de fertilizantes. En la década de 1950, la acuicultura de recirculación también surgió en respuesta a limitaciones de agua similares en las regiones áridas para aprovechar mejor los recursos hídricos disponibles y contener mejor los desechos. Sin embargo, la eliminación de los lodos de tales sistemas siguió siendo problemática, lo que llevó a la llegada de la acuaponía, en donde el reciclaje de nutrientes producidos por los peces como fertilizante para las plantas demostró ser una solución innovadora para la descarga de desechos que también tenía ventajas económicas al producir un segundo producto comercializable. También se demostró que la acuaponía es una tecnología adaptable y rentable dado que las granjas podrían ubicarse en áreas que de otra manera no serían adecuadas para la agricultura, por ejemplo, en tejados y en sitios de fábricas abandonados y sin uso. Se podría lograr una amplia gama de ahorros en los costos mediante la ubicación estratégica de los sitios de acuaponía para reducir los costos de adquisición de tierras y al permitir la agricultura más cerca de las áreas suburbanas y urbanas, lo que reduce los costos de transporte a los mercados y, por lo tanto, también las huellas de producción de combustibles fósiles y CO^2.

Palabras clave: Acuaponía; Agricultura sostenible; Eutrofización; Degradación del suelo; Ciclo de nutrientes.

A. Joyce (*)
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden. e-mail: alyssa.joyce@gu.se
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands
e-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
B. Kotzen
School of Design, University of Greenwich, London, UK. e-mail: b.kotzen@greenwich.ac.uk
S. Wuertz
Department Ecophysiology and Aquaculture, Leibniz-Institute of Freshwater Biology and Inland Fisheries, Berlin, Germany. e-mail: wuertz@igb-berlin.de

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2

2.1. INTRODUCCIÓN

El término "punto de inflexión" se usa actualmente para describir sistemas naturales que están al borde de un cambio significativo y potencialmente catastrófico (Barnosky et al. 2012). Los sistemas de producción agrícola de alimentos se consideran uno de los servicios ecológicos clave que se acercan a un punto de inflexión, ya que el cambio climático genera cada vez más nuevos riesgos de plagas y enfermedades, fenómenos climáticos extremos y temperaturas mundiales más altas. La mala gestión de la tierra y las prácticas de conservación del suelo, el agotamiento de los nutrientes del suelo y el riesgo de pandemias también amenazan los suministros mundiales de alimentos.

Las tierras cultivables disponibles para la expansión agrícola son limitadas, y el aumento de la productividad agrícola en las últimas décadas se debe principalmente a una mayor intensidad de cultivos y mejores rendimientos de cultivos en comparación con la expansión de la superficie agrícola (por ejemplo, el 90% de las ganancias en la producción de cultivos han sido como resultado de una mayor productividad, pero solo un 10% debido a la expansión de la tierra) (Alexandratos y Bruinsma 2012; Schmidhuber 2010). Se estima que la población mundial alcanzará los 8.310.900 millones de personas en 2050 (Bringezu et al. 2014), y esta creciente población mundial, con un aumento correspondiente en el consumo total y per cápita, plantea una amplia gama de nuevos desafíos sociales. El Informe del Documento de Trabajo de Global Land Outlook de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD) observa las tendencias preocupantes que afectan la producción de alimentos (Thomas et al. 2017), incluida la degradación de la tierra, la pérdida de biodiversidad y los ecosistemas, y una menor resiliencia en respuesta al medio ambiente, tensiones ambientales, así como un abismo cada vez mayor entre la producción de alimentos y la demanda. La distribución desigual de los suministros de alimentos da como resultado cantidades inadecuadas de alimentos o la falta de alimentos de calidad nutricional suficiente para parte de la población mundial, mientras que en otras partes del mundo el consumo excesivo y las enfermedades relacionadas con la obesidad son cada vez más comunes. Esta desequilibrada yuxtaposición de hambre y desnutrición en algunas partes del mundo, con el desperdicio de alimentos y el consumo excesivo en otras, refleja complejos factores interrelacionados que incluyen la voluntad política, la escasez de recursos, la asequibilidad de la tierra, los costos de energía y fertilizantes, la infraestructura de transporte y un anfitrión, de otros factores socioeconómicos que afectan la producción y distribución de alimentos.

Los reexámenes recientes de los enfoques a la seguridad alimentaria han determinado que se requiere un enfoque de "nexo agua-energía-alimentos" para comprender, analizar y gestionar de manera efectiva las interacciones entre los sistemas de recursos globales (Scott et al. 2015). El enfoque nexo reconoce la interrelación de la base de recursos (tierra, agua, energía, capital y trabajo) con sus impulsores, y alienta las consultas y colaboraciones intersectoriales para equilibrar los diferentes objetivos e intereses de los usuarios de recursos. Su objetivo es maximizar los beneficios generales al tiempo que se mantiene la integridad del ecosistema para lograr la seguridad alimentaria.

Por lo tanto, la producción sostenible de alimentos requiere una utilización reducida de los recursos, en particular, el agua, la tierra y los combustibles fósiles que son limitados, costosos y a menudo, están mal distribuidos en relación con el crecimiento de la población, así como el reciclaje de los recursos existentes, como el agua y los nutrientes dentro de los sistemas de producción minimizar los residuos.

En este capítulo, discutimos una serie de desafíos actuales en relación con la seguridad alimentaria, centrándonos en las limitaciones de recursos y las formas en que las nuevas tecnologías y los enfoques interdisciplinarios como la acuaponía pueden ayudar a abordar el nexo agua-alimentos-energía en relación con los objetivos de las Naciones Unidas para la sostenibilidad y el desarrollo. Nos concentramos en la necesidad de un mayor reciclaje de nutrientes, reducciones en el consumo de agua y energía no renovable, así como una mayor producción de alimentos en tierras marginales o inadecuadas para la agricultura.

2.2 OFERTA Y DEMANDA DE ALIMENTOS

2.2.1 Predicciones

En los últimos 50 años, el suministro total de alimentos ha aumentado casi tres veces, mientras que la población mundial solo se ha duplicado, un cambio que ha sido acompañado por cambios significativos en la dieta relacionados con la prosperidad económica (Keating et al. 2014). En los últimos 25 años, la población mundial aumentó en un 90% y se espera que alcance la marca de 7,6 mil millones en la primera mitad de 2018 (Worldometers). Las estimaciones del aumento de la demanda mundial de alimentos en 2050 con respecto a 2010 varían entre 45% y 71%, dependiendo de los supuestos sobre los biocombustibles y los desechos, pero claramente hay una brecha de producción que debe llenarse. Para evitar una reversión en la reciente tendencia a la baja de la desnutrición, debe haber reducciones en

la demanda de alimentos y / o menos pérdidas en la capacidad de producción de alimentos (Keating et al. 2014). Una razón cada vez más importante para el aumento de la demanda de alimentos es el consumo per cápita, como resultado del aumento del ingreso per cápita, que está marcado por los cambios hacia alimentos ricos en proteínas, particularmente carne (Ehrlich y Harte 2015b). Esta tendencia crea nuevas presiones en la cadena de suministro de alimentos, ya que los sistemas de producción basados en animales generalmente requieren una cantidad desproporcionadamente mayor de recursos, tanto en consumo de agua como en insumos de alimento (Rask y Rask 2011; Ridoutt et al. 2012; Xue y Landis 2010). A pesar de que la tasa de aumento de la demanda de alimentos ha disminuido en las últimas décadas, si las trayectorias actuales en el crecimiento de la población y los cambios en la dieta son realistas, la demanda mundial de productos agrícolas crecerá en 1,1–1,5% por año hasta 2050 (Alexandratos y Bruinsma 2012).

El crecimiento de la población en las zonas urbanas ha ejercido presión sobre la tierra que se ha utilizado tradicionalmente para cultivos basados en el suelo: las demandas de vivienda y servicios continúan invadiendo las tierras agrícolas de primera calidad y aumentan su valor mucho más allá de lo que los agricultores podrían obtener del cultivo. Cerca del 54% de la población mundial ahora vive en áreas urbanas (Esch et al. 2017), y la tendencia hacia la urbanización no muestra signos de disminuir.

Los sistemas de producción que pueden suministrar alimentos frescos de manera confiable cerca de los centros urbanos tienen demanda y aumentarán a medida que aumente la urbanización. Por ejemplo, el aumento de la agricultura vertical en los centros urbanos como Singapur, donde la tierra es muy importante, ofrece una fuerte pista de que los sistemas agrícolas concentrados y altamente productivos serán una parte integral del desarrollo urbano en el futuro. Los avances tecnológicos están haciendo cada vez más económicos los sistemas de cultivo en interiores, por ejemplo, el desarrollo de luces LED para horticultura que son extremadamente duraderas y la eficiencia energética ha aumentado la competitividad de la agricultura de interior, así como la producción en latitudes altas.

El análisis de la agrobiodiversidad muestra consistentemente que los países de ingresos altos y medios obtienen diversos alimentos a través del comercio nacional o internacional, pero esto también implica que la producción y la diversidad alimentaria están desacopladas y, por lo tanto, son más vulnerables a las interrupciones en las líneas de suministro que en los países de bajos ingresos donde La mayoría de los alimentos se producen a nivel nacional o regional (Herrero et al.2017). Además, a medida que

aumenta el tamaño de las granjas, la diversidad de cultivos, especialmente para los cultivos que pertenecen a grupos de alimentos altamente nutritivos (verduras, frutas, carne), tiende a disminuir a favor de los cereales y las legumbres, lo que nuevamente corre el riesgo de limitar la disponibilidad local y regional de una gama de diferentes grupos de alimentos (Herrero et al.2017).

2.3 TIERRA CULTIVABLE Y NUTRIENTES

2.3.1 Predicciones

Aun cuando se necesita producir más alimentos, la tierra utilizable para prácticas agrícolas está inherentemente limitada a aproximadamente el 20-30% de la superficie terrestre del mundo. La disponibilidad de tierras agrícolas está disminuyendo, y hay una escasez de tierras adecuadas donde más se necesitan, es decir, particularmente cerca de los centros de población. La degradación del suelo es uno de los principales contribuyentes a esta disminución y, en general, se puede clasificar de dos maneras: desplazamiento (erosión por viento y agua) y deterioro químico y físico interno del suelo (pérdida de nutrientes y / o materia orgánica, salinización, acidificación, contaminación, etc. compactación y anegamiento). La estimación de la degradación total del suelo natural e inducida por el hombre en todo el mundo está llena de dificultades dada la variabilidad en las definiciones, la gravedad, el tiempo, la categorización del suelo, etc. Sin embargo, en general se acepta que sus consecuencias han dado como resultado la pérdida de la producción primaria neta sobre grandes áreas (Esch et al.2017), lo que restringe los aumentos en tierras de cultivo y cultivos permanentes al 13% en las cuatro décadas desde principios de los años sesenta hasta fines de los noventa (Bruinsma 2003). Más importante aún en relación con el crecimiento de la población durante ese período de tiempo, la tierra cultivable per cápita disminuyó en aproximadamente un 40% (Conforti 2011).

El término "tierra cultivable" implica la disponibilidad de nutrientes adecuados para apoyar la producción de cultivos. Para contrarrestar el agotamiento de nutrientes, el consumo mundial de fertilizantes aumentó de 90 kg / ha en 2002 a 135 kg en 2013 (Pocketbook 2015). Sin embargo, el mayor uso de fertilizantes a menudo resulta en excesos de nitrato y fosfatos que terminan en los ecosistemas acuáticos (Bennett et al. 2001), causando floraciones de algas y eutrofización cuando la biomasa de algas en descomposición consume oxígeno y limita la biodiversidad de la vida acuática. Los cambios ambientales inducidos por nitratos y fosfatos a gran escala son particularmente evidentes en las cuencas hidrográficas y las

zonas costeras.

El nitrógeno, el potasio y el fósforo son los tres nutrientes principales esenciales para el crecimiento de las plantas. A pesar de que la demanda de fertilizantes de fósforo continúa creciendo exponencialmente, las reservas de fosfato de roca son limitadas y las estimaciones sugieren que se agotarán dentro de 50 a 100 años (Cordell et al. 2011; Steen 1998; Van Vuuren et al.2010). Además, se espera que el aporte antropogénico de nitrógeno conduzca a los ecosistemas terrestres hacia mayores limitaciones de fósforo, aunque una mejor comprensión de los procesos es crítica (Deng et al. 2017; Goll et al. 2012; Zhu et al. 2016). Actualmente, no hay sustitutos para el fósforo en la agricultura, lo que limita la productividad agrícola futura que depende del aporte de fertilizantes clave del fosfato extraído (Sverdrup y Ragnarsdottir 2011). La 'paradoja P', en otras palabras, un exceso de P que perjudica la calidad del agua, junto con su escasez como un recurso no renovable agotador, significa que debe haber un aumento sustancial en el reciclaje y la eficiencia de su uso (Leinweber et al.2018) Prácticas agrícolas intensivas modernas, como la frecuencia y el momento de la labranza o labranza cero, la aplicación de herbicidas y pesticidas, y la adición poco frecuente de materia orgánica que contiene micronutrientes pueden alterar la estructura del suelo y su biodiversidad microbiana, de modo que la adición de fertilizantes ya no aumenta la productividad por hectárea. Dado que los cambios en el uso de la tierra han resultado en pérdidas de carbono orgánico del suelo que se estima en alrededor del 8%, y las pérdidas proyectadas entre 2010 y 2050 son 3.5 veces esa cifra, se supone que la capacidad de retención de agua del suelo y las pérdidas de nutrientes continuarán, especialmente en vista del calentamiento global (Esch et al. 2017). Obviamente, hay compensaciones entre satisfacer las necesidades humanas y no comprometer la capacidad de la biosfera para sostener la vida (Foley et al. 2005). Sin embargo, es claro cuando se modelan los límites planetarios en relación con las prácticas actuales de uso de la tierra que es necesario mejorar el ciclo de N y P, principalmente reduciendo las emisiones de nitrógeno y fósforo y la escorrentía de las tierras agrícolas, pero también mediante una mejor captura y reutilización (Conijn et al.2018).

2.3.2 Acuaponía y nutrientes.

Uno de los principales beneficios de la acuaponía es que permite el reciclaje de los recursos nutricionales. El aporte de nutrientes al componente del pescado se deriva del alimento, cuya composición depende de la especie objetivo, pero el alimento en acuicultura generalmente constituye una porción significativa de los costos de insumo y puede ser más de la mitad

del costo total anual de producción. En ciertos diseños de acuaponia, la biomasa bacteriana también se puede aprovechar como alimento, por ejemplo, donde la producción de biofloc hace que los sistemas acuaponicos sean cada vez más autónomos (Pinho et al.2017).

Las aguas residuales de los corrales o conductos abiertos de la jaula a menudo se descargan en los cuerpos de agua, donde resultan en la contaminación de nutrientes y la posterior eutrofización. Por el contrario, los sistemas acuaponicos toman los nutrientes disueltos de los alimentos y las heces no consumidos, y utilizan microbios que pueden descomponer la materia orgánica, convertir el nitrógeno y el fósforo en formas biodisponibles para su uso por las plantas en la unidad hidropónica. Para lograr niveles de producción de plantas económicamente aceptables, la presencia de ensamblajes microbianos apropiados reduce la necesidad de agregar gran parte de los nutrientes suplementarios que se usan habitualmente en unidades hidropónicas independientes. Por lo tanto, la acuaponía es un sistema de descarga cercano a cero que ofrece no solo beneficios económicos tanto de las corrientes de producción de peces como de plantas, sino también reducciones significativas en las descargas ambientalmente nocivas de los sitios de acuicultura. También elimina el problema de la escorrentía rica en N y P de los fertilizantes utilizados en la agricultura basada en el suelo. En los sistemas de acuaponía desacoplados, los biorreactores aeróbicos o anaeróbicos también se pueden utilizar para tratar lodos y recuperar macro y micronutrientes significativos en formas biodisponibles para su posterior uso en la producción hidropónica (Goddek et al.2018) (véase el capítulo 8). Nuevos desarrollos emocionantes como estos, muchos de los cuales ahora se están realizando para la producción comercial, continúan refinando el concepto de economía circular al permitir cada vez más la recuperación de nutrientes.

2.4 CONTROL DE PLAGAS, MALEZAS Y ENFERMEDADES

2.4.1 Predicciones

En general, se reconoce que el control de enfermedades, plagas y malezas es un componente crítico para frenar las pérdidas de producción que amenazan la seguridad alimentaria (Keating et al. 2014). De hecho, aumenta el uso de antibióticos, insecticidas, herbicidas y hongos.

El hecho de reducir las pérdidas y mejorar la productividad ha permitido aumentos dramáticos en la producción agrícola en la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, estas prácticas también están vinculadas a una serie de problemas: contaminación por compuestos orgánicos persistentes en

suelos y agua de riego, cambios en la actividad rizobacteriana y micorrízica en suelos, contaminación de cultivos y ganado, desarrollo de cepas resistentes, efectos perjudiciales en los polinizadores y un amplia gama de riesgos para la salud humana (Bringezu et al.2014; Ehrlich y Harte 2015a; Esch et al.2017; FAO 2015b). La lucha contra el control de plagas, malezas y enfermedades de manera que reduzca el uso de estas sustancias se menciona en prácticamente todas las llamadas para proporcionar seguridad alimentaria a una creciente población mundial.

2.4.2 Control de plagas, malezas y enfermedades

Como sistema cerrado con medidas de bioseguridad, los sistemas acuapónicos requieren muchas menos aplicaciones de pesticidas químicos en el componente de la planta. Si las reservas de semillas y trasplantes se manejan y monitorean cuidadosamente, los contaminantes de malezas, hongos y bacterias / algas se pueden controlar en unidades hidropónicas con medidas específicas en lugar de la aplicación preventiva generalizada de herbicidas y fungicidas prevalentes en la agricultura basada en el suelo. A medida que la tecnología continúa avanzando, desarrollos como los invernaderos de presión positiva pueden reducir aún más los problemas de plagas (Mears y Both 2001). Las características de diseño para reducir los riesgos de plagas pueden reducir los costos en términos de productos químicos, mano de obra, tiempo de aplicación y equipo, especialmente porque la huella de la tierra de los sistemas de acuaponía a escala industrial es pequeña, y los sistemas son compactos y estrictamente contenidos, en comparación con el área de producción abierta equivalente de cultivos de hortalizas y frutas de granjas convencionales basadas en el suelo. El uso de RAS en los sistemas de acuaponia también previene la transmisión de enfermedades entre las poblaciones cultivadas y las poblaciones silvestres, lo cual es una preocupación apremiante en la acuicultura de corrales abiertos y de red abierta (Read et al. 2001; Samuel-Fitwi et al. 2012). El uso de antibióticos de rutina generalmente no se requiere en el componente RAS, ya que es un sistema cerrado con pocos vectores disponibles para la introducción de la enfermedad. Además, generalmente se desaconseja el uso de antimicrobianos y antiparasitarios, ya que puede ser perjudicial para la microbiota que son cruciales para convertir los desechos orgánicos e inorgánicos en compuestos utilizables para el crecimiento de las plantas en la unidad hidropónica (Junge et al. 2017) Si la enfermedad emerge, la contención de peces y plantas del entorno circundante hace que la descontaminación y la erradicación sean más manejables. Aunque los sistemas cerrados claramente no alivian completamente todas las enfermedades y problemas de plagas (Goddek et al. 2015), las medidas de biocontrol adecuadas que ya se practican en RAS autónomos e hidropónicos resultan

en reducciones significativas de riesgo. Estos temas se discuten con más detalle en capítulos posteriores (para peces, ver el Capítulo 6; para plantas, más detalles en el Capítulo 14).

2.5 LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.5.1 Predicciones

Además de requerir aplicaciones de fertilizantes, las prácticas agrícolas intensivas modernas también imponen altas demandas sobre los recursos hídricos. Entre los flujos bioquímicos (Fig. 2.1), ahora se cree que la escasez de agua es uno de los factores más importantes que limitan la producción de alimentos (Hoekstra et al. 2012; Porkka et al. 2016). El aumento proyectado de la población mundial y los cambios en la disponibilidad de agua terrestre debido al cambio climático exigen un uso más eficiente del agua en la agricultura. Como se señaló anteriormente, por 2050, la producción agrícola agregada deberá producir un 60% más de alimentos a nivel mundial (Alexandratos y Bruinsma 2012), con un estimado de 100% más en los países en desarrollo, en función del crecimiento de la población y el aumento de las expectativas de nivel de vida (Alexandratos y Bruinsma 2012; OMS 2015) La hambruna en algunas regiones del mundo, así como la desnutrición y el hambre oculta, indican que el equilibrio entre la demanda y la disponibilidad de alimentos ya ha alcanzado niveles críticos, y que la seguridad alimentaria y del agua están directamente vinculadas (McNeill et al.2017). Las predicciones del cambio climático sugieren una menor disponibilidad de agua dulce y una disminución correspondiente en los rendimientos agrícolas para fines del siglo XXI (Misra 2014).

El sector agrícola actualmente representa aproximadamente el 70% del uso de agua dulce en todo el mundo, y la tasa de extracción incluso supera el 90% en la mayoría de los países menos desarrollados del mundo. La escasez de agua aumentará en los próximos 25 años debido al crecimiento demográfico esperado (Connor et al. 2017; Esch et al. 2017), con los últimos modelos que pronostican la disminución de la disponibilidad de agua en el futuro cercano para casi todos los países (Distefano y Kelly 2017). La ONU predice que la búsqueda de prácticas comerciales habituales dará como resultado un déficit mundial de agua del 40% para 2030 (Water 2015). A este respecto, a medida que los suministros de agua subterránea para riego se agotan o contaminan, y las regiones áridas experimentan más sequía y escasez de agua debido al cambio climático, el agua para la producción agrícola será cada vez más valiosa (Ehrlich y Harte 2015a). La creciente escasez de recursos hídricos compromete no solo la seguridad del agua para el consumo humano sino también la producción mundial de alimen-

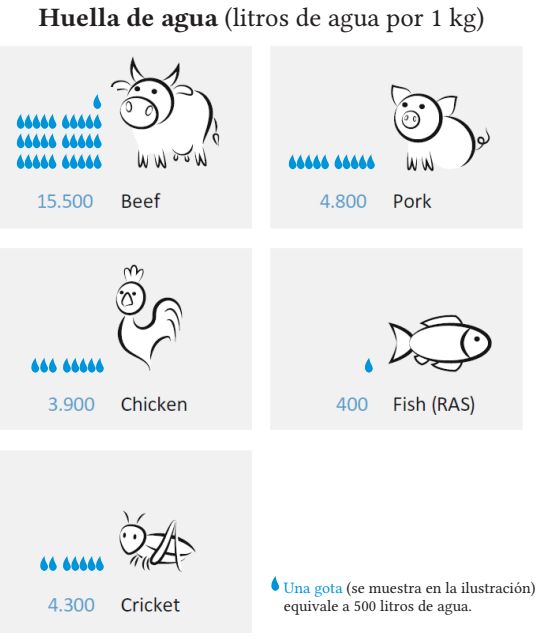


Fig. 2.1 Huella hídrica (L por kg). Los peces en los sistemas RAS usan la menor cantidad de agua que cualquier sistema de producción de alimentos.

tos (McNeill et al. 2017) Dado que se espera escasez de agua incluso en áreas que actualmente tienen recursos hídricos relativamente suficientes, es importante desarrollar técnicas agrícolas con bajos requerimientos de insumos de agua y mejorar la gestión ecológica de las aguas residuales mediante una mejor reutilización (FAO 2015a). El Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo para 2017 (Connor et al.2017) se centra en las aguas residuales como una fuente de energía, nutrientes y otros subproductos útiles sin explotar, con implicaciones no solo para la salud humana y ambiental, sino también para la seguridad alimentaria y energética.

Así como la mitigación del cambio climático. Este informe requiere tecnologías apropiadas y asequibles, junto con marcos legales y regulatorios, mecanismos de financiamiento y una mayor aceptación social del tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de lograr la reutilización del agua dentro de una economía circular. El informe también apunta a un informe del Foro Económico Mundial 2016 que enumera la crisis del agua como el riesgo global de mayor preocupación en los próximos 10 años. El concepto de huella hídrica como una medida del uso que los humanos hacen de los recursos de agua dulce se ha presentado para informar el desarrollo de políticas sobre el uso del agua. Una huella hídrica tiene tres componentes: (1) agua azul, que comprende el agua superficial y subterrá-

nea consumida mientras se fabrican productos o se pierden por evaporación, (2) agua verde que es agua de lluvia, especialmente en la producción de cultivos y (3) agua gris, que es agua contaminada pero aún dentro de los estándares de calidad del agua existentes (Hoekstra y Mekonnen 2012). Estos autores mapearon las huellas hídricas de países de todo el mundo y descubrieron que la producción agrícola representa el 92% del uso mundial de agua dulce, y la producción industrial utiliza el 4,4% del total, mientras que el agua doméstica solo el 3,6%.

Esto plantea preocupaciones sobre la disponibilidad de agua y ha resultado en esfuerzos de educación pública dirigidos a crear conciencia sobre las cantidades de agua requeridas para producir varios tipos de alimentos, así como las vulnerabilidades nacionales, especialmente en los países con escasez de agua en el norte de África y Oriente Medio.

2.5.2 Acuaponía y conservación del agua

El concepto económico de productividad comparativa mide la cantidad relativa de un recurso necesario para producir una unidad de bienes o servicios. La eficiencia generalmente se interpreta como mayor cuando el requerimiento de ingreso de recursos es menor por unidad de bienes y servicios. Sin embargo, cuando se examina la eficiencia del uso del agua en un contexto ambiental, la calidad del agua también debe tenerse en cuenta, porque mantener o mejorar la calidad del agua también aumenta la productividad (Hamdy 2007).

El creciente problema de la escasez de agua exige mejoras en la eficiencia del uso del agua, especialmente en las regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua para la agricultura y la calidad del agua de descarga son factores críticos en la producción de alimentos. En estas regiones, la recirculación de agua en las unidades de acuaponia puede lograr una notable eficiencia de reutilización del agua del 95-99% (Dalsgaard et al. 2013). La demanda de agua también es inferior a 100 L / kg de pescado cosechado, y la calidad del agua se mantiene dentro del sistema para la producción de cultivos (Goddek et al. 2015). Obviamente, tales sistemas deben ser construidos y operados para minimizar las pérdidas de agua; también deben optimizar sus proporciones de agua de peces a plantas, ya que esta proporción es muy importante para maximizar la eficiencia de reutilización del agua y garantizar el máximo reciclaje de nutrientes. Se están desarrollando algoritmos de modelado y soluciones técnicas para integrar mejoras en unidades individuales y para comprender mejor cómo gestionar el agua de manera efectiva y eficiente (Vilbergsson et al. 2016). Se proporciona más información en Chaps. 9 y 11.

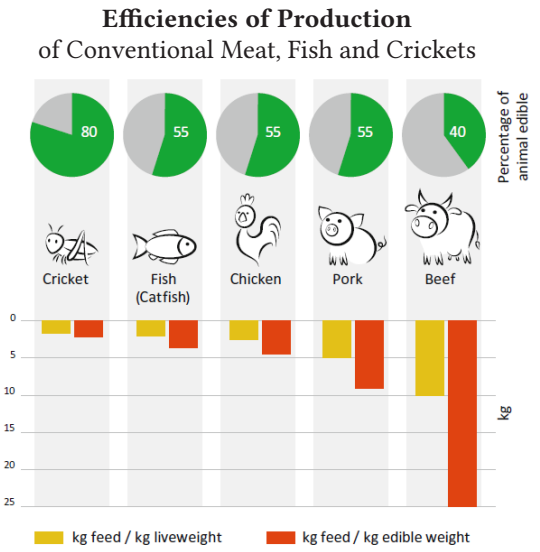


Fig. 2.2. Relaciones de conversión de alimento (FCR) basadas en kg de alimento por peso vivo y kg de alimento para la porción comestible. Solo los insectos, que se comen enteros en algunas partes del mundo, tienen un FCR mejor que el pescado.

A la luz de los requisitos de suelo, agua y nutrientes, la huella hídrica de los sistemas acuaponicos es considerablemente mejor que la agricultura tradicional, donde la calidad del agua y la demanda, junto con la disponibilidad de tierra cultivable, los costos de los fertilizantes y el riego son restricciones para la expansión (Fig. 2.1).

2.6 UTILIZACIÓN DE LA TIERRA

2.6.1 Predicciones

A nivel mundial, los cultivos terrestres y las pasturas ocupan aproximadamente el 33% del total de la tierra disponible, y se estima que la expansión para usos agrícolas entre 2000 y 2050 aumentará en un 7–31% (350–1500 Mha, dependiendo de la fuente y los supuestos subyacentes), con mayor frecuencia a expensas de los bosques y humedales (Bringezu et al. 2014). Si bien actualmente todavía hay tierras clasificadas como 'buenas' o 'marginales' que están disponibles para la agricultura de secano, porciones significativas de la misma están lejos de los mercados, carecen de infraestructura o tienen enfermedades endémicas, terrenos inadecuados u otras condiciones que limitan el desarrollo potencial. En otros casos, las tierras restantes ya están protegidas, boscosas o desarrolladas para otros usos

(Alexandratos y Bruinsma 2012). Por el contrario, los ecosistemas de tierras secas, definidos en la Comisión de Desarrollo Sostenible de la ONU como áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas que generalmente tienen baja productividad, están amenazados por la desertificación y, por lo tanto, no son aptos para la expansión agrícola, sin embargo, millones de personas viven en proximidad (Economic 2007). Estos hechos apuntan a la necesidad de una intensificación más sostenible de la producción de alimentos más cerca de los mercados, preferiblemente en tierras en gran parte improductivas que nunca pueden ser adecuadas para la agricultura basada en el suelo.

Algunos expertos consideran que los dos factores más importantes que contribuyen a las eficiencias de los insumos agrícolas son (i) la ubicación de la producción de alimentos en áreas donde las condiciones climáticas (y del suelo) aumentan naturalmente las eficiencias y (ii) las reducciones en los impactos ambientales de la producción agrícola (Michael y David 2017). Debe haber un aumento en el suministro de biomasa cultivada logrado a través de la intensificación de la producción por hectárea, acompañado de una carga ambiental disminuida (por ejemplo, degradación de la estructura del suelo, pérdida de nutrientes, contaminación tóxica). En otras palabras, la huella de la producción eficiente de alimentos debe reducirse mientras se minimizan los impactos ambientales negativos.

2.6.2 Acuaponía y utilización de la tierra

Los sistemas de producción de acuaponicos carecen de suelo e intentan reciclar nutrientes esenciales para el cultivo de peces y plantas, por lo que utilizan nutrientes en la materia orgánica de los piensos y desechos para minimizar o eliminar la necesidad de fertilizantes para plantas. Por ejemplo, en tales sistemas, el uso de tierra para minar, procesar, almacenar y transportar fertilizantes ricos en fosfato o potasa se vuelve innecesario, eliminando así el costo inherente y el costo de aplicación de estos fertilizantes. La producción acuapónica contribuye no solo a la eficiencia del uso del agua (Sección 2.5.2) sino también a la eficiencia de los insumos agrícolas al reducir la huella de tierra necesaria para la producción. Las instalaciones, por ejemplo, pueden ubicarse en tierras no cultivables y en áreas suburbanas o urbanas más cercanas a los mercados, reduciendo así la huella de carbono asociada con las granjas rurales y el transporte de productos a los mercados de la ciudad. Con una huella más pequeña, la capacidad de producción puede ubicarse en áreas que de otra manera serían improductivas, como en los techos o en las antiguas fábricas, lo que también puede reducir los costos de adquisición de tierras si esas áreas se consideran inadecuadas para viviendas o negocios minoristas. Una huella

más pequeña para la producción de proteínas y vegetales de alta calidad en acuaponía también puede reducir la presión sobre la limpieza de áreas naturales y seminaturales ecológicamente valiosas para la agricultura convencional.

2.7 ENERGÍA Y RECURSOS

2.7.1 Predicciones

A medida que la mecanización se extiende a nivel mundial, la agricultura intensiva de campo abierto depende cada vez más de los combustibles fósiles para impulsar la maquinaria agrícola y para el transporte de fertilizantes y productos agrícolas, así como para operar el equipo para el procesamiento, el envasado y el almacenamiento. En 2010, la Agencia Internacional de Energía de la OCDE predijo que el consumo mundial de energía crecería hasta un 50% para 2035.

También se estima que el 30% del consumo mundial de energía se dedica a la producción de alimentos y su cadena de suministro (FAO 2011). Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con los combustibles fósiles (aproximadamente el 14% en el análisis del ciclo de vida) se agregaron a las de la fabricación de fertilizantes (16%) y el óxido nitroso de los suelos promedio (44%) (Camargo et al.2013), todos contribuyen sustancialmente a los impactos ambientales de la agricultura. Una tendencia en el siglo XXI a producir biocombustibles basados en cultivos (por ejemplo, maíz para etanol) para reemplazar los combustibles fósiles ha aumentado la presión sobre la tala de bosques tropicales, turberas, sabanas y pastizales para la producción agrícola. Sin embargo, los estudios apuntan a la creación de una "deuda de carbono" a partir de tales prácticas, ya que la liberación general de CO2 excede las reducciones en los GEI que proporcionan al desplazar los combustibles fósiles (Fargione et al. 2008). Podría decirse que existe una deuda de carbono similar cuando se limpia la tierra para cultivar alimentos a través de la agricultura convencional que depende de combustibles fósiles.

En un análisis comparativo de los sistemas de producción agrícola, se descubrió que las pesquerías de arrastre y los sistemas de recirculación de la acuicultura (RAS) emiten gases de efecto invernadero de 2 a 2.5 veces más que las pesquerías de arrastre y la acuicultura no RAS (corrales, canales). En RAS, estos requisitos de energía se relacionan principalmente con el funcionamiento de bombas y filtros (Michael y David 2017). De manera similar, los sistemas de producción en invernadero pueden emitir hasta tres veces más GEI que la producción de cultivos de campo abierto si

se requiere energía para mantener el calor y la Luz dentro de los rangos óptimos (ibid.). Sin embargo, estas cifras de GEI no tienen en cuenta otros impactos ambientales de los sistemas que no son RAS, Como la eutrofización o las posibles transferencias de patógenos a las poblaciones silvestres. Tampoco consideran los GEI de la producción, el transporte y la aplicación de herbicidas y plaguicidas utilizados en el cultivo en campo abierto, ni el metano y el óxido nitroso de la producción ganadera asociada, los cuales tienen un potencial de calentamiento del invernadero (PCG) de 100 años 25 y 298 veces más que el CO2, respectivamente (Camargo et al. 2013; Eggleston et al. 2006).

Estas estimaciones aleccionadoras del consumo de energía presente y futuro y las emisiones de GEI asociadas con la producción de alimentos han provocado nuevos modelos y enfoques, por ejemplo, el enfoque de nexo agua-alimentos-energía de la ONU mencionado en la sección. 2.1. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU han señalado la vulnerabilidad de la producción de alimentos a las fluctuaciones en los precios de la energía como un factor clave de la inseguridad alimentaria. Esto ha impulsado los esfuerzos para hacer que los sistemas agroalimentarios sean "energéticamente inteligentes" con énfasis en mejorar la eficiencia energética, aumentar el uso de fuentes de energía renovables y fomentar la integración de la producción de alimentos y energía (FAO 2011).

2.7.2 Acuaponía y conservación de energía

Los avances tecnológicos en las operaciones del sistema acuapónico se están moviendo hacia ser cada vez más "energéticamente inteligentes" y reducir la deuda de carbono de las bombas, filtros y dispositivos de calefacción / refrigeración mediante el uso de electricidad generada a partir de fuentes renovables. Incluso en latitudes templadas, muchos diseños nuevos permiten que la energía involucrada en el calentamiento y enfriamiento de tanques de peces e invernaderos se reintegra completamente, de modo que estos sistemas no requieren entradas más allá de los paneles solares o la electricidad / calor generado de la producción de biogás bacteriano de lodos derivados de la acuicultura (Ezebuiro y Körner 2017; Goddek y Keesman 2018; Kloas et al.2015; Yogev et al.2016). Además, los sistemas acuaponicos pueden utilizar la desnitrificación microbiana para convertir el óxido nitroso en gas nitrógeno si hay suficientes fuentes de carbono de los desechos, de modo que las bacterias anaerobias heterotróficas y facultativas puedan convertir el exceso de nitratos en gas nitrógeno (Van Rijn et al. 2006). Como se señaló en la sección. 2.7.1, el óxido nitroso es un potente GEI y los microbios ya presentes en los sistemas cerrados de acuaponía pueden facilitar su conversión en nitrógeno gaseoso.

2.8 RESUMEN

A medida que la población humana continúa aumentando, hay una demanda creciente de proteínas de alta calidad en todo el mundo. En comparación con las fuentes de carne, los peces son ampliamente reconocidos como una fuente de proteína particularmente saludable. En relación con el suministro mundial de alimentos, la acuicultura ahora proporciona más proteínas de pescado que las pesquerías de captura (FAO 2016). A nivel mundial, el consumo humano per cápita de pescado continúa aumentando a una tasa promedio anual de 3.2% (1961–2013), que es el doble de la tasa de crecimiento de la población. En el período de 1974 a 2013, la "sobrepesca" biológicamente insostenible ha aumentado en 22% Durante el mismo período, la captura de lo que se considera pesca "totalmente explotada" ha disminuido en un 26%. Por lo tanto, la acuicultura proporciona la única solución posible para satisfacer la mayor demanda del mercado. Ahora es el sector alimentario de más rápido crecimiento y, por lo tanto, un componente importante de la seguridad alimentaria (ibid.).

Con una población mundial estimada en 8,3-10,9 mil millones de personas para 2050 (Bringezu et al. 2014), el desarrollo sostenible de los sectores de la acuicultura y la agricultura requiere optimización en términos de eficiencia de producción, pero también reducciones en la utilización de recursos limitados, en particular, agua, tierra y fertilizantes. Los beneficios de la acuaponía se relacionan no solo con los usos eficientes de la tierra, el agua y los recursos de nutrientes, sino que también permiten una mayor integración de las oportunidades de energía inteligente, como el biogás y la energía solar. En este sentido, la acuaponia es una tecnología prometedora para producir proteínas y vegetales de pescado de alta calidad de manera que pueden usar sustancialmente menos tierra, menos energía y menos agua, al tiempo que minimizan los insumos químicos y fertilizantes que se utilizan en la producción de alimentos convencionales.

REFERENCIAS

Alexandratos N, Bruinsma J. (2012) World agriculture towards 2030/50: the 2012 revision, ESA Work. Paper 12–03. UN Food Agriculture Organization (FAO), Rome

Barnosky A.D, Hadly E.A, Bascompte J, Berlow E.L, Brown J.H, Fortelius M, Getz W.M, Harte J, Hastings A, Marquet P.A. (2012) Approaching a state shift in Earth/'s biosphere. Nature. 486:52–5

Bennett E.M, Carpenter S.R, Caraco N.F. (2001) Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: a global perspective: increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes,

and coastal oceans with eutrophication. AIBS Bull 51:227–234
Bringezu S, Schütz H, Pengue W, OBrien M, Garcia F, Sims R (2014) Assessing global land use: balancing consumption with sustainable supply. UNEP/International Resource Panel, Nairobi/ Paris
Bruinsma J (2003) World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective. Earthscan, London
Camargo GG, Ryan MR, Richard TL (2013) Energy use and greenhouse gas emissions from crop production using the farm energy analysis tool. Bioscience 63:263–273
Conforti P (2011) Looking ahead in world food and agriculture: perspectives to 2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
Conijn J, Bindraban P, Schröder J, Jongschaap R (2018) Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? Agric Ecosyst Environ 251:244–256
Connor R, Renata A, Ortigara C, Koncagül E, Uhlenbrook S, Lamizana-Diallo B.M, Zadeh S.M, Qadir M, Kjellén M, Sjödin J (2017) The United Nations world water development report 2017. In: Wastewater: the untapped resource, The United Nations world water development report. UNESCO, Paris
Cordell D, Rosemarin A, Schröder J, Smit A (2011) Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. Chemosphere 84:747–758
Dalsgaard J, Lund I, Thorarinsdottir R, Drengstig A, Arvonen K, Pedersen PB (2013) Farming different species in RAS in Nordic countries: current status and future perspectives. Aquac Eng. 53:2–13
Deng Q, Hui D, Dennis S, Reddy KC (2017) Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition: a meta-analysis. Glob Ecol Biogeogr 26:713–728
Distefano T, Kelly S (2017) Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. Ecol Econ 142:130–147
Economic UNDo (2007) Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies. United Nations Publications, New York
Eggleston H, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (2006) IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Inst Glob Environ Strateg, Hayama, Japan 2:48–56
Ehrlich PR, Harte J (2015a) Food security requires a new revolution. Int J Environ Stud 72:908–920
Ehrlich PR, Harte J (2015b) Opinion: to feed the world in 2050 will require a global revolution. Proc Natl Acad Sci 112:14743–14744
Esch Svd, Brink Bt, Stehfest E, Bakkenes M, Sewell A, Bouwman A, Meijer J, Westhoek H, Berg Mvd, Born GJvd (2017) Exploring future changes in land use and land condition and the impacts on food,

water, climate change and biodiversity: scenarios for the UNCCD Global Land Outlook. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague
Ezebuiro NC, Körner I (2017) Characterisation of anaerobic digestion substrates regarding trace elements and determination of the influence of trace elements on the hydrolysis and acidification phases during the methanisation of a maize silage-based feedstock. J Environ Chem Eng. 5:341–351
FAO (2011) Energy-smart food for people and climate. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
FAO (2015a) Environmental and social management guidelines. Food and Agriculture Organiza- tion of the United Nations, Rome
FAO (2015b) Statistical pocketbook 2015. Food and Agriculture Organization of the United. Nations, Rome.
FAO (2016) The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p 200
Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S, Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. Science 319:1235–1238
Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK (2005) Global consequences of land use. Science 309:570–574
Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224
Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS - based sludge in sequential UASB - EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.07.003
Goll DS, Brovkin V, Parida B, Reick CH, Kattge J, Reich PB, Van Bodegom P, Niinemets Ü (2012) Nutrient limitation reduces land carbon uptake in simulations with a model of combined carbon, nitrogen and phosphorus cycling. Biogeosciences 9:3547–3569
Hamdy A (2007) Water use efficiency in irrigated agriculture: an analytical review. Water use efficiency and water productivity: WASAMED project, pp 9–19
Herrero M, Thornton PK, Power B, Bogard JR, Remans R, Fritz S, Gerber JS, Nelson G, See L, Waha K (2017) Farming and the geography of

nutrient production for human use: a transdis- ciplinary analysis. Lancet Planetary Health 1:e33–e42
Hoekstra AY, Mekonnen MM (2012) The water footprint of humanity. Proc Natl Acad Sci. 109:3232–3237
Hoekstra AY, Mekonnen MM, Chapagain AK, Mathews RE, Richter BD (2012) Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. PLoS One 7:e32688
Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182
Keating BA, Herrero M, Carberry PS, Gardner J, Cole MB (2014) Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. Glob Food Sec 3:125–132
Kloas W, Groß R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquac Envi - Ron Interact 7:179–192
Leinweber P, Bathmann U, Buczko U, Douhaire C, Eichler-Löbermann B, Frossard E, Ekardt F, Jarvie H, Krämer I, Kabbe C (2018) Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: scarcity, necessity, and burden of P. Ambio 47:3–19
McNeill K, Macdonald K, Singh A, Binns AD (2017) Food and water security: analysis of integrated modeling platforms. Agric Water Manag 194:100–112
Mears D, Both A (2001) A positive pressure ventilation system with insect screening for tropical and subtropical greenhouse facilities. Int Symp Des Environ Control Trop Subtrop Greenh 578:125–132
Michael C, David T (2017) Comparative analysis of environmental impacts of agricultural produc- tion systems, agricultural input efficiency, and food choice. Environ Res Lett 12:064016
Misra A.K. (2014) Climate change and challenges of water and food security. Int J Sustain Built. Environ 3:153–165
Pinho SM, Molinari D, de Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MGC (2017) Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. Ecol Eng 103:146–153
Pocketbook F.S (2015) World food and agriculture (2015). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
Porkka M, Gerten D, Schaphoff S, Siebert S, Kummu M (2016) Causes and trends of water scarcity in food production. Environ Res Lett 11:015001
Rask K.J, Rask N. (2011) Economic development and food produc- tion–consumption balance: a growing global challenge. Food Policy

36:186–196
Read P, Fernandes T, Miller K (2001) The derivation of scientific guidelines for best environmental practice for the monitoring and regulation of marine aquaculture in Europe. J Appl Ichthyol. 17:146–152
Ridoutt B.G, Sanguansri P, Nolan M, Marks N (2012) Meat consumption and water scarcity: beware of generalizations. J Clean Prod 28:127e133
Samuel-Fitwi B, Wuertz S, Schroeder J.P, Schulz C (2012) Sustainability assessment tools to support aquaculture development. J Clean Prod 32:183–192
Schmidhuber J. (2010) FAO's long-term outlook for global agriculture–challenges, trends and drivers. International Food & Agriculture Trade Policy Council
Scott C.A, Kurian M, Wescoat J.L Jr (2015) The water-energy-food nexus: enhancing adaptive capacity to complex global challenges, Governing the nexus. Springer, Cham, pp 15–38
Steen I (1998) Management of a non-renewable resource. Phosphorus Potassium 217:25–31
Sverdrup HU, Ragnarsdottir KV (2011) Challenging the planetary boundaries II: assessing the sustainable global population and phosphate supply, using a systems dynamics assessment model. Appl Geochem 26:S307–S310
Thomas, R., Reed, M., Clifton, K., Appadurai, A., Mills, A., Zucca, C., Kodsi, E., Sircely, J., Haddad, F., vonHagen, C., 2017. Scaling up sustainable land management and restoration of degraded land
Van Rijn J, Tal Y, Schreier HJ (2006) Denitrification in recirculating systems: theory and applications. Aquac Eng 34:364–376
Van Vuuren DP, Bouwman AF, Beusen AH (2010) Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. Glob Environ Chang 20:428–439
Vilbergsson B, Oddsson GV, Unnthorsson R (2016) Taxonomy of means and ends in aquaculture production–part 2: the technical solutions of controlling solids, dissolved gasses and pH. Water 8:387
Water U (2015) Water for a sustainable world, The United Nations world water development report. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris
WHO (2015) Progress on sanitation and drinking water: 2015 update and MDG assessment. World Health Organization, Geneva
Xue X, Landis AE (2010) Eutrophication potential of food consumption patterns. Environ Sci Technol 44:6450–6456
Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics.

Water 8:589
Zhu Q, Riley W, Tang J, Koven C (2016) Multiple soil nutrient competition between plants, microbes, and mineral surfaces: model development, parameterization, and example applications in several tropical forests. Biogeosciences 13:341

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 3

TECNOLOGÍAS DE RECIRCULACIÓN EN ACUICULTURA

Carlos A. Espinal y Daniel Matulić

Capítulo 3.

TECNOLOGÍAS DE RECIRCULACIÓN EN ACUICULTURA

Carlos A. Espinal y Daniel Matulić*

Resumen
La tecnología de recirculación de la acuicultura, que incluye acuaponía, se ha desarrollado durante los últimos 40 años a partir de una combinación de tecnologías derivadas de los sectores de tratamiento de aguas residuales y acuicultura. Hasta hace poco, las granjas de recirculación de sistemas de acuicultura (RAS) han sido relativamente pequeñas en comparación con otros tipos de producción acuícola moderna. Las últimas dos décadas han visto un aumento significativo en el desarrollo de esta tecnología, con una mayor aceptación y escala del mercado. Este capítulo proporciona una breve descripción de la historia, los procesos de control de calidad del agua, los nuevos desarrollos y los desafíos actuales de RAS.

Palabras clave: Sistemas de recirculación acuícola (RAS);Tratamiento de aguas residuales, Biofiltro; Desnitrificación; Tecnología de membrana

3.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de recirculación de acuicultura (RAS) describen sistemas intensivos de producción de peces que utilizan una serie de pasos de tratamiento de agua para depurar el agua de cría de peces y facilitar su reutilización. El RAS generalmente incluirá (1) dispositivos para eliminar partículas sólidas del agua que se componen de heces de peces, alimento no consumido y floculos bacterianos (Chen et al. 1994; Couturier et al. 2009), (2) biofiltros nitrificantes para oxidar el amoníaco excretado por los peces al nitrato (Gutiérrez-Wing y Malone 2006) y (3) una serie de dispositivos de

C.A. Espinal (Autor de correspondencia*)
Landing Aquaculture, Oirschot, The Netherlands. e-mail: carlos@landingaquaculture.com

D. Matuli´c
Department of Fisheries, Beekeeping, Game management and Special Zoology, Faculty of Agriculture, University of Zagreb, Zagreb, Croatia. e-mail: dmatulic@agr.hr

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_3

intercambio de gases para eliminar el dióxido de carbono disuelto expulsado por los peces y / o agregar oxígeno requerido por los peces y las bacterias nitrificantes (Colt y Watten 1988 ; Moran 2010; Summerfelt 2003; Wagner Adicionalmente, RAS también puede usar irradiación UV para la desinfección del agua (Sharrer et al. 2005; Summerfelt et al. 2009), ozonización y desnatado de proteínas para sólidos finos y control microbiano (Attramadal et al. 2012a; Gonçalves y Gagnon 2011; Summerfelt y Hochheimer 1997) y sistemas de desnitrificación para eliminar el nitrato (van Rijn et al. 2006).

La tecnología moderna de recirculación acuícola se ha desarrollado durante más de 40 años, pero las nuevas tecnologías ofrecen cada vez más formas de cambiar los paradigmas del RAS tradicional, incluidas las mejoras en los procesos clásicos como la captura de sólidos, la biofiltración y el intercambio de gases. RAS también ha experimentado importantes desarrollos en términos de escala, capacidades de producción y aceptación en el mercado, con sistemas que se vuelven progresivamente más grandes y robustos.
Este capítulo analiza cómo se ha desarrollado la tecnología RAS en los últimos dos décadas desde un período de consolidación tecnológica hasta una nueva era de implementación industrial.

3.1.1 Historia del RAS

La primera investigación científica sobre RAS realizada en Japón en la década de 1950 se centró en el diseño de biofiltros para la producción de carpas debido a la necesidad de utilizar recursos hídricos localmente limitados de manera más productiva (Murray et al. 2014). En Europa y los Estados Unidos, los científicos también intentaron adaptar las tecnologías desarrolladas para el tratamiento de aguas residuales domésticas con el fin de reutilizar mejor el agua dentro de los sistemas de recirculación (por ejemplo, procesos de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales, biofiltros de goteo, sumergido y de flujo descendente y varias filtraciones mecánicas). Estos primeros esfuerzos incluyeron principalmente el trabajo en sistemas marinos para la producción de peces y crustáceos, pero pronto se adoptaron en regiones áridas donde el sector agrícola está restringido por el suministro de agua. En acuicultura, se han diseñado diferentes soluciones para maximizar el uso del agua, incluidos los sistemas de recirculación altamente intensivos que incorporan sistemas de filtración de agua como filtros de tambor, filtros biológicos, espumadores de proteínas y sistemas de inyección de oxígeno (Hulata y Simon 2011). A pesar de la fuerte convicción de los pioneros en la industria sobre la viabilidad comercial de su trabajo, la mayoría de los primeros

estudios se centraron exclusivamente en la oxidación de los desechos tóxicos de nitrógeno inorgánico derivados del metabolismo de las proteínas.

La confianza en la tecnología se vio reforzada por la operación exitosa de los acuarios públicos y domésticos, que generalmente cuentan con unidades de tratamiento de gran tamaño para garantizar un agua cristalina. Además, las densidades de almacenamiento extremadamente bajas y los insumos de alimentación asociados significaron que dicha sobre ingeniería aún hizo una contribución relativamente pequeña a los costos de capital y operativos del sistema en comparación con el RAS intensivo. En consecuencia, los cambios en la dinámica del proceso asociados con el cambio de escala no se contabilizaron, lo que resultó en la reducción del tamaño de las unidades de tratamiento RAS para minimizar los costos de capital. Como consecuencia, los márgenes de seguridad eran demasiado estrechos o inexistentes (Murray et al. 2014). Debido a que muchos de los científicos pioneros tenían antecedentes biológicos más que de ingeniería, las mejoras técnicas también se vieron limitadas por la falta de comunicación entre científicos, diseñadores, Personal de construcción y operadores. El desarrollo de una terminología estandarizada, unidades de medida y formatos de informes en 1980 (EIFAC / ICES 1980) ayudó abordar la situación, aunque las diferencias regionales aún persistían. No fue sino hasta mediados de la década de 1980 que los parámetros cíclicos de calidad del agua se reconocieron como importantes en la producción de estanques, p. Ej. midiendo periódicamente las concentraciones de pH, oxígeno, TAN (nitrógeno amoniacal total), NO2 (nitrato), DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno). En la última parte del siglo pasado, se publicaron numerosos artículos sobre el desarrollo temprano de RAS. Rosenthal (1980) elaboró sobre el estado de los sistemas de recirculación en Europa occidental, mientras que Bovendeur et al. (1987) desarrollaron un sistema de recirculación de agua para el cultivo de peces gato africanos en relación con la producción de desechos y la cinética de eliminación de desechos (se presentó un diseño para un sistema de tratamiento de agua que consiste en un clarificador primario y un reactor de película fija aeróbico que demostró resultados satisfactorios en el cultivo de alta densidad del pez gato africano). Este trabajo fue parte del rápido desarrollo de los sistemas de cultivo de peces hasta mediados de la década de 1990 en el norte y oeste de Europa (Rosenthal y Black 1993), así Como en América del Norte (Colt 1991). Las nuevas clasificaciones, como la clasificación según la forma en que el agua fluye a través de un sistema de acuicultura, proporcionaron información clave con respecto a los procesos de calidad del agua que son importantes para la producción de peces (Krom y van Rijn 1989). En el trabajo posterior de van Rijn (1996), se introdujeron

conceptos centrados en los procesos biológicos subyacentes a los sistemas de tratamiento. Las conclusiones de este trabajo fueron que incorporar métodos para reducir la acumulación de lodo y nitrato resultó en condiciones de calidad del agua más estables dentro de las unidades de cultivo. Durante este período, la producción de RAS aumentó significativamente en volumen y diversidad de especies (Rosenthal 1980; Verreth y Eding 1993; Martins et al. 2005). Hoy en día, se producen más de 10 especies en RAS (pez gato africano, anguila y trucha como especies principales de agua dulce y rodaballo, lubina y lenguado como especies marinas principales) (Martins et al 2010b), con RAS convirtiéndose también en un elemento crucial en la producción de larvas y juveniles de diversas especies.

Si bien se han alcanzado o se alcanzarán pronto los rendimientos máximos sostenibles de muchas especies de animales silvestres acuáticos, y muchas especies ya están sobreexplotadas, RAS se considera una tecnología clave que ayudará al sector de la acuicultura a satisfacer las necesidades de especies acuáticas en las próximas décadas (Ebeling y Timmons 2012).

3.1.2 Una corta historia de la Acuaponia en el contexto del RAS.

La acuaponía es un término que se ha "acuñado" en la década de 1970, pero en la práctica tiene raíces antiguas, aunque todavía hay discusiones sobre su primera aparición. Los aztecas cultivaban islas agrícolas conocidas como chinampas (las primeras 1150–1350 a. C.), en un sistema considerado por algunos como la primera forma de acuaponía para uso agrícola (Fig. 3.1). En tales sistemas, las plantas se cultivaron en islas estables, o en ocasiones móviles y flotantes, ubicadas en aguas poco profundas de los lagos donde se podía dragar el lodo rico en nutrientes.

Fig. 3.1 Chinampas (jardines flotantes) en Centro América– islas artificiales construidas como antecedente de la tecnología Aquaponía. (Fromm Marzo) lino/ Shutterstock.com)

De los canales de chinampa y colocados en las islas para apoyar el crecimiento de las plantas (Cross ley 2004). Un ejemplo aún más temprano de acuaponía comenzó en el otro lado del mundo en el sur de China y se cree que se extendió dentro del sudeste asiático, donde los colonos chinos de Yunnan se establecieron alrededor de 5 CE. Los agricultores cultivaron y cultivaron arroz en arrozales en combinación con peces (FAO 2001). Estos sistemas de cultivo policultural existieron en muchos países del Lejano Oriente para criar peces como el loach oriental (*Misgurnus anguillicaudatus*) (Tomita-Yokotani et al. 2009), anguila de pantano (fam. Synbranchidae), carpa común (*Cyprinus carpio*) y carpa cruciana (*Carassius carassius*) (FAO 2004). Sin embargo, en esencia, estos no eran sistemas acuapónicos, pero pueden describirse mejor como ejemplos tempranos de sistemas integrados de acuicultura (Gómez 2011). En el siglo XX, los primeros intentos de crear sistemas de producción de peces prácticos, eficientes e integrados junto con las verduras se realizaron en la década de 1970 con el trabajo de Lewis y Naegel (Lewis y Wehr 1976; Naegel 1977; Lewis et al. 1978). Otros sistemas tempranos fueron diseñados por Waten y Busch en 1984 y Rakocy en 1989 (Palm et al. 2018).

3.2 REVISIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA EN RAS

Los RAS son sistemas complejos de producción acuática que involucran una variedad de interacciones físicas, químicas y biológicas (Timmons y Ebeling 2010). Comprender estas interacciones y las relaciones entre los peces en el sistema y el equipo utilizado es crucial para predecir cualquier cambio en la calidad del agua y el rendimiento del sistema. Existen más de 40 parámetros de calidad del agua que se pueden usar para determinar la calidad del agua en la acuicultura (Timmons y Ebeling 2010). De estos, solo unos pocos (como se describe en las Secciones. 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6 y 3.2.7) se controlan tradicionalmente en los principales procesos de recirculación, dado que estos procesos pueden afectar rápidamente la supervivencia de los peces y son propensos a cambiar con la adición de alimento al sistema. Normalmente, muchos otros parámetros de calidad del agua no son monitoreados o controlados porque (1) el análisis de la calidad del agua puede ser costoso, (2) el contaminante a analizar puede diluirse con el intercambio diario de agua, (3) se descartan posibles fuentes de agua que los contengan o (4) porque sus posibles efectos negativos no se han observado en la práctica. Por lo tanto, los siguientes parámetros de calidad del agua se monitorean normalmente en RAS.

3.2.1 Oxígeno Disuelto (DO)

El oxígeno disuelto (OD) es generalmente el parámetro más importante de

la calidad del agua en los sistemas acuáticos intensivos, ya que los niveles bajos de OD pueden provocar rápidamente un alto estrés en los peces, un mal funcionamiento del biofiltro nitrificante y, de hecho, pérdidas significativas de peces. Comúnmente, las densidades de almacenamiento, la adición de alimento, la temperatura y la tolerancia de las especies a la hipoxia determinarán los requisitos de oxígeno de un sistema. Como el oxígeno puede transferirse al agua en concentraciones superiores a su concentración de saturación en condiciones atmosféricas (esto se denomina sobresaturación), existe una gama de dispositivos y diseños para garantizar que los peces reciban suficiente oxígeno.

En RAS, el OD puede controlarse mediante aireación, adición de oxígeno puro o una combinación de estos. Dado que la aireación solo es capaz de elevar las concentraciones de OD al punto de saturación atmosférica, la técnica generalmente se reserva para sistemas con poca carga o sistemas con especies tolerantes como la tilapia o el pez gato. Sin embargo, los aireadores también son un componente importante del RAS comercial donde el uso de oxígeno técnico costoso se reduce al airear el agua con un bajo contenido de oxígeno disuelto de vuelta al punto de saturación antes de sobresaturar el agua con oxígeno técnico. Existen varios tipos de aireadores y oxigenadores que pueden usarse en RAS y estos se dividen en dos grandes categorías: sistemas de gas a líquido y de líquido a gas (Lekang 2013). Los aireadores de gas a líquido comprenden principalmente sistemas de aireación difusa donde el gas (aire u oxígeno) se transfiere al agua, creando burbujas que intercambian gases con el medio líquido (Fig. 3.2). Otros sistemas de gas a líquido incluyen el paso de gases a través de difusores, tuberías perforadas o placas perforadas para crear burbujas usando inyectores Venturi que crean masas de pequeñas burbujas o dispositivos que atrapan burbujas de gas en la corriente de agua, como el cono Speece y el oxigenador de tubo en U.

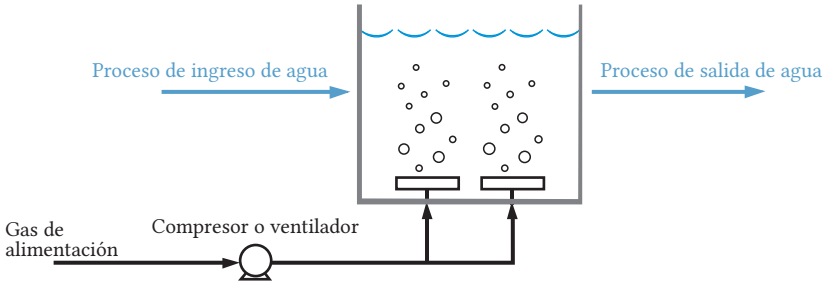


Fig. 3.2 Diagramas de dos ejemplos de transferencia de gas a líquido: aireación difusa e inyectores Venturi /aspiradores

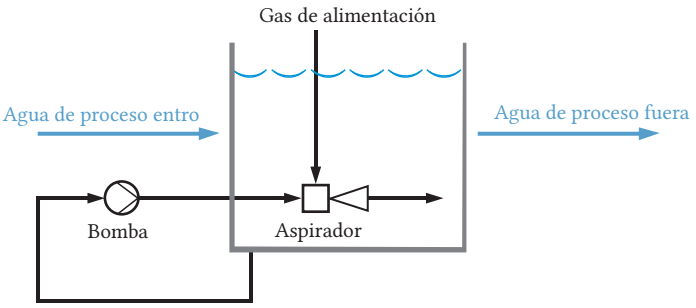


Fig. 3.3 Diagramas de dos ejemplos de transferencia de líquido a gas: el aireador de columna empaquetado y las salpicaduras de superficie en un tanque cerrado. El aireador de columna empaquetado permite que el agua gotee por un recipiente cerrado, generalmente lleno de medios estructurados, donde el aire es forzado a través del uso de un ventilador o soplador. Las salpicaduras de superficie que se encuentran en la acuicultura en estanques también se pueden usar en atmósferas cerradas enriquecidas con gases, normalmente oxígeno, para la transferencia de gases.

Los aireadores de líquido a gas se basan en difundir el agua en pequeñas gotas paralelamente el área de superficie disponible para el contacto con el aire, o crear una atmósfera enriquecida con una mezcla de gases (Fig. 3.3). El aireador de columna empaquetado (Colt y Bouck 1984) y los oxigenadores de cabeza baja (LHO) (Wagner et al. 1995) son ejemplos de sistemas de líquido a gas utilizados en la recirculación de la acuicultura. Sin embargo, otros sistemas de líquido a gas populares en estanques y granjas al aire libre, como los aireadores de rueda de paletas (Fast et al. 1999) también se usan en RAS. Existe considerable literatura disponible sobre la teoría del intercambio de gases y los fundamentos de la transferencia de gases en el agua, y se recomienda al lector no solo consultar los textos de ingeniería acuícola y acuicultura, sino también consultar materiales de ingeniería de procesos y tratamiento de aguas residuales para una mejor comprensión de estos procesos.

3.2.2 Amonio

En un medio acuoso, el amonio existe en dos formas: una forma no ionizada (NH_3) que es tóxica para el pez y una forma ionizada (NH_4^+) que tiene baja toxicidad para el pez. Estos dos forman el nitrógeno amoniacal total (TAN), en el que la relación entre las dos formas está controlada por el pH, la temperatura y la salinidad. El amonio se acumula en el agua de cría Como producto del metabolismo proteico del pescado (Altinok y Grizzle 2004) y puede alcanzar concentraciones tóxicas si no se trata. De los 35

tipos diferentes de peces de agua dulce que se han estudiado, el valor promedio de toxicidad aguda para el amonio es 2,79 mg de Nh_3 / l (Randall y Tsui 2002).

El amonio se ha tratado tradicionalmente en sistemas de recirculación con biofiltros nitrificantes, dispositivos diseñados para promover comunidades microbianas que pueden oxidar el amonío en nitrato (NO3). Aunque el uso de biofiltros nitrificantes no es nuevo, el RAS contemporáneo ha visto una racionalización de los diseños de biofiltros, con solo unos pocos diseños bien estudiados que tienen una amplia aceptación. Se han desarrollado otras técnicas altamente innovadoras para tratar el amonío en los últimos años, pero no se aplican ampliamente en el mercado (ejemplos se indican a continuación).

El amonío es oxidado en biofiltros por comunidades de bacterias nitrificantes. Las bacterias nitrificantes son organismos quimiolitotróficos que incluyen especies de los géneros *Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrospira, Nitrobacter* y *Nitrococcus* (Prosser 1989). Estas bacterias obtienen su energía de la oxidación de compuestos de nitrógeno inorgánico (Mancinelli 1996) y crecen lentamente (la replicación ocurre 40 veces más lenta que para las bacterias heterotróficas) son fácilmente superadas por las bacterias heterotróficas si el carbono orgánico, principalmente presente en biosólidos suspendidos en el agua de cultivo, se les permite acumular (Grady y Lim 1980). Durante la operación RAS, la buena gestión del sistema depende en gran medida de minimizar los sólidos en suspensión a través de técnicas adecuadas de eliminación de sólidos (Fig. 3.4).

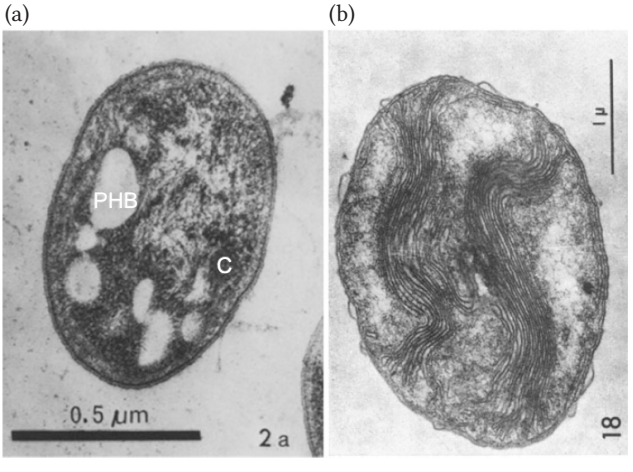


Fig. 3.4 Bacterias nitrificantes *Nitrosomonas* (izquierda) y *Nitrobacter* (derecha). (Foto izquierda: Bock et al. 1983. Foto derecha: Murray y Watson 1965)

Los biofiltros de nitrificación o los reactores de biofiltro se han clasificado aproximadamente en dos categorías principales: crecimiento suspendido y sistemas de crecimiento adjuntos (Malone y Pfeiffer 2006). En los sistemas de crecimiento suspendidos, las comunidades bacterianas nitrificantes crecen libremente en el agua, formando floculos bacterianos que también albergan ecosistemas ricos donde están presentes protozoos, ciliados, nematodos y algas (Manan et al. 2017). Con una adecuada mezcla y aireación, las algas, las bacterias, el zooplancton, las partículas de alimentación y la materia fecal permanecen suspendidas en la columna de agua y flotan juntas de forma natural, formando las partículas que dan nombre a los sistemas de cultivo Biofloc (Browdy et al. 2012). La principal desventaja de los sistemas de crecimiento suspendidos es su tendencia a perder su biomasa bacteriana a medida que el agua del proceso sale del reactor, lo que requiere un medio para capturarla y devolverla al sistema. En los sistemas de crecimiento conectados, las formas sólidas (granos de arena, piedras, elementos plásticos) se utilizan como sustratos para retener las bacterias dentro del reactor y, por lo tanto, no necesitan un paso de captura de sólidos posterior al tratamiento.

En general, los sistemas de crecimiento unidos proporcionan más área de superficie para las uniones bacterianas que los sistemas de crecimiento suspendidos, y no producen sólidos significativos en su flujo de salida, que es una de las razones principales por las que los biofiltros de crecimiento unidos se han usado con tanta frecuencia en RAS.

Se han realizado esfuerzos para clasificar los biofiltros y documentar su desempeño para ayudar a los agricultores y diseñadores a especificar sistemas con un mayor grado de confiabilidad (Drennan et al. 2006; Gutiérrez-Wing y Malone 2006). En los últimos años, la industria de la acuicultura ha optado por diseños de biofiltros que han sido ampliamente estudiados y, por lo tanto, pueden ofrecer un rendimiento predecible. El biorreactor de lecho móvil (Rusten et al. 2006), el biorreactor de filtro de arena fluido (Summerfelt 2006) y el lecho fijo El biorreactor (Emparanza 2009; Zhu y Chen 2002) son ejemplos de diseños de biofiltros de crecimiento adjuntos que se han convertido en estándar en los RAS comerciales modernos. Los filtros de goteo (Díaz et al. 2012), otro diseño popular, han visto reducida su popularidad debido a sus requisitos de bombeo relativamente altos y tamaños relativamente grandes.

3.2.3 Biosolidos

Los biosólidos en RAS se originan a partir de alimento para peces, heces y biopelículas (Timmons y Ebeling 2010) y son uno de los parámetros más críticos y difíciles de controlar la calidad del agua. Los biosólidos sirven como sustrato para el crecimiento bacteriano heterotrófico, un aumento en su concentración puede eventualmente resultar en un mayor consumo de oxígeno, un bajo rendimiento del biofiltro (Michaud et al. 2006), una mayor turbidez del agua e incluso bloqueo mecánico de partes del sistema (Becke et al. 2016; Chen et al.1994; Couturier y col. 2009).

En RAS, los biosólidos generalmente se clasifican tanto por su tamaño como por su capacidad de eliminación mediante ciertas técnicas. De la fracción total de sólidos producidos en un RAS, los sólidos sedimentables son aquellos generalmente mayores de 100 µm y que pueden eliminarse por separación por gravedad. Los sólidos suspendidos, con tamaños que varían de 100 µm a 30 µm, son aquellos que no se depositan en suspensión, pero que pueden eliminarse por medios mecánicos (es decir, tamizado). Los sólidos finos, con tamaños de menos de 30 µm, generalmente son aquellos que no pueden eliminarse mediante tamizado, y deben controlarse por otros medios, como procesos fisicoquímicos, procesos de filtración de membrana, dilución o bioclarificación (Chen et al. 1994; Lee 2014; Summerfelt y Hochheimer 1997; Timmons y Ebeling 2010; Wold et al.2014). Las técnicas para controlar los sólidos sedimentables y suspendidos son bien conocidas y desarrolladas, y existe una extensa literatura sobre el tema. Por ejemplo, el uso de tanques de drenaje doble, separadores de remolino, separadores de flujo radial y depósitos de sedimentación es un medio popular para controlar los sólidos sedimentables (Couturier et al. 2009; Davidson y Summerfelt 2004; De Carvalho et al. 2013; Ebeling et al. 2006; Veerapen et al.2005). Los filtros de microscreen son el método más popular para el control de sólidos en suspensión (Dolan et al. 2013; Fernandes et al. 2015) y a menudo se usan en la industria para controlar los sólidos sedimentables y suspendidos con una sola técnica. Otros dispositivos populares de captura de sólidos son los filtros de profundidad, como los filtros de cuentas (Cripps y Bergheim 2000) y los filtros de arena rápidos, que también son populares en aplicaciones de piscinas. Además, las pautas de diseño para evitar la acumulación de sólidos en tanques, tuberías, sumideros y otros componentes del sistema también están disponibles en la literatura (Davidson y Summerfelt 2004; Lekang 2013; Wong y Piedrahíta 2000). Por último, los sólidos finos en RAS se tratan comúnmente mediante ozonización, bioclarificación, fraccionamiento de espuma o una combinación de estas técnicas. Los últimos años en el desarrollo de RAS se han centrado en una mayor comprensión de cómo controlar la

fracción de sólidos finos y comprender su efecto sobre el bienestar y el rendimiento del sistema.

3.2.4 Dióxido de Carbono (CO_2)

En RAS, el control de gases disueltos no se detiene con el suministro de oxígeno a los peces. Otros gases disueltos en el agua de cría pueden afectar el bienestar de los peces si no se controlan. Las altas concentraciones de dióxido de carbono disuelto (CO_2) en el agua inhiben la difusión de CO_2 desde la sangre de los peces. En peces, el aumento de CO_2 en la sangre reduce el pH de la sangre y, a su vez, la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno (Noga 2010). Las altas concentraciones de CO_2 también se han asociado con nefrocalcinosis, granulomas sistémicos y depósitos calcáreos en los órganos de los salmónidos (Noga 2010). El CO_2 en RAS se origina como un producto de la respiración heterotrófica por peces y bacterias. Como gas altamente soluble, el dióxido de carbono no alcanza el equilibrio atmosférico tan fácilmente como el oxígeno o el nitrógeno y, por lo tanto, debe ponerse en contacto con grandes volúmenes de aire con una baja concentración de CO_2 para garantizar la transferencia fuera del agua (Summerfelt 2003). Como una regla general, los RAS que se suministran con oxígeno puro requerirán alguna forma de eliminación de dióxido de carbono, mientras que los RAS que se suministran con aireación para suplementación con oxígeno no requerirán la eliminación activa de CO_2 (Eshchar et al. 2003; Loyless y Malone 1998).

En teoría, cualquier dispositivo de transferencia / aireación de gas abierto a la atmósfera ofrecerá alguna forma de eliminación de CO_2. Sin embargo, los dispositivos especializados de extracción de dióxido de carbono requieren que grandes volúmenes de aire se pongan en contacto con el agua del proceso. Los diseños de separadores de CO_2 se han centrado principalmente en dispositivos de tipo cascada, como aireadores en cascada, biofiltros de goteo y, lo que es más importante, el aireador de columna empaquetado (Colt y Bouck 1984; Moran 2010; Summerfelt 2003), que se ha convertido en un equipo estándar en el comercio RAS operando con oxígeno puro. Aunque el desarrollo de la tecnología de aireación en columna empaquetada ha avanzado en los últimos años, la mayor parte de la investigación realizada en este dispositivo se ha centrado en comprender su rendimiento en diferentes condiciones (es decir, agua dulce vs agua de mar) y variaciones de diseño como alturas, tipos de embalaje y tasas de ventilación. Se sabe que el efecto de la velocidad de carga hidráulica (flujo unitario por unidad de área del desgasificador) tiene un efecto en la eficiencia de un desgasificador, pero se necesita más investigación para comprender mejor este parámetro de diseño.

3.2.5 Presión Total de Gas (PTG)

La presión de gas total (PTG) se define como la suma de las presiones parciales de todos los gases disueltos en una solución acuosa. Cuanto menos soluble es un gas, más "espacio" ocupa en la solución acuosa y, por lo tanto, más presión ejerce en ella. De los principales gases atmosféricos (nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono), el nitrógeno es el menos soluble (por ejemplo, 2,3 veces menos soluble que el oxígeno y más de 90 veces menos soluble que el dióxido de carbono). Por lo tanto, el nitrógeno contribuye a la presión de gas total más que cualquier otro gas, pero no es consumido por los peces o las bacterias heterotróficas, por lo que se acumulará en el agua a menos que se elimine. También es importante tener en cuenta que el oxígeno también contribuirá a un alto PTG si el proceso de transferencia de gas no permite que el exceso de gases sea desplazado fuera de la solución. Un ejemplo clásico de esto son los estanques con actividad foto autotrófica en ellos. Los fotoautótrofos (generalmente organismos vegetales que llevan a cabo la fotosíntesis) liberan oxígeno en el agua, mientras que una superficie de agua tranquila puede no proporcionar suficiente intercambio de gases para que el exceso de gas escape a la atmósfera y, por lo tanto, puede ocurrir una sobresaturación. Los peces requieren presiones de gas totales iguales a la presión atmosférica. Si los peces respiran agua con una presión de gas total alta, el exceso de gas (generalmente nitrógeno) sale del torrente sanguíneo y forma burbujas, con efectos graves para la salud de los peces (Noga 2010). En acuicultura esto se conoce Como enfermedad de burbujas de gas. Evitar un alto PTG requiere un examen cuidadoso de todas las áreas en el RAS donde puede ocurrir la transferencia de gas. La inyección de oxígeno a alta presión sin desgasificación (permitiendo que el exceso de nitrógeno sea desplazado fuera del agua) también puede contribuir a un alto PTG. En sistemas con peces que son muy sensibles a PTG, el uso de vacío los desgasificadores son una opción (Colt y Bouck 1984). Sin embargo, mantener un RAS libre de áreas de presurización de gas incontrolada, usando separadores de dióxido de carbono (que también eliminarán nitrógeno) y dosificando oxígeno técnico con cuidado, es suficiente para mantener el PTG a niveles seguros en RAS comercial.

3.2.6 Nitrato

El nitrato (NO_3) es el producto final de la nitrificación y comúnmente el último parámetro que se controla en RAS, debido a su toxicidad relativamente baja (Davidson et al. 2014; Schroeder et al. 2011; van Rijn 2013). Esto se atribuye principalmente a su baja permeabilidad en la membrana branquial (Camargo y Alonso 2006). La acción tóxica del nitrato es similar

a la del nitrito, afectando la capacidad de las moléculas transportadoras de oxígeno. El control de las concentraciones de nitrato en RAS se ha logrado tradicionalmente por dilución, controlando efectivamente el tiempo de retención hidráulica o la tasa de cambio diario. Sin embargo, el control biológico del nitrato usando reactores de desnitrificación es un área creciente de investigación y desarrollo en RAS. La tolerancia al nitrato puede variar según la especie acuática y la etapa de la vida, y la salinidad tiene un efecto de mejora sobre su toxicidad. Es importante que los operadores de RAS comprendan los efectos crónicos de la exposición al nitrato en lugar de los efectos agudos, ya que probablemente no se alcanzarán concentraciones agudas durante la operación normal de RAS.

3.2.7 Alcalinidad

La alcalinidad se define, en términos generales, como la capacidad de amortiguación del pH del agua (Timmons y Ebeling 2010). El control de la alcalinidad en RAS es importante ya que la nitrificación es un proceso de formación de ácido que lo destruye. Además, las bacterias nitrificantes requieren un suministro constante de alcalinidad. La baja alcalinidad en RAS dará como resultado cambios de pH y un mal funcionamiento del biofiltro nitrificante (Summerfelt et al. 2015; Colt 2006). La adición de alcalinidad en RAS estará determinada por la actividad de nitrificación en los sistemas, que a su vez está relacionada con la adición de alimento, por el contenido de alcalinidad del agua de reposición (intercambio diario) y por la presencia de actividad desnitrificante, que restaura la alcalinidad. (Van Rijn et al. 2006).

3.3 Desarrollo en RAS

Los últimos años han visto un aumento en el número y el tamaño de las granjas acuícolas de recirculación, especialmente en Europa. Con el aumento en la aceptación de la tecnología, siguen surgiendo mejoras sobre los enfoques de ingeniería tradicionales, las innovaciones y los nuevos desafíos técnicos. La siguiente sección describe las tendencias clave de diseño e ingeniería y los nuevos desafíos que enfrenta la tecnología de recirculación acuícola.

3.3.1 Oxigenación del Flujo Principal

El control del oxígeno disuelto en los RAS modernos tiene como objetivo aumentar la eficiencia de la transferencia de oxígeno y disminuir los requisitos de energía de este proceso. El aumento de la eficiencia de transferencia de oxígeno se puede lograr mediante el diseño de sistemas

que retengan el gas oxígeno en contacto con el agua durante más tiempo, mientras que se puede lograr una disminución en los requisitos de energía mediante el uso de sistemas de transferencia de oxígeno de baja altura o el uso de sistemas que no utilizan electricidad en todos, como los sistemas de oxígeno líquido conectados a difusores de oxígeno que funcionan solo por presión. Un factor de definición de los oxigenadores de baja presión es la concentración disuelta relativamente baja que se puede lograr en comparación con los sistemas de alta presión. Para superar esta limitación, los dispositivos de oxigenación de baja carga se colocan estratégicamente para tratar el flujo de recirculación completo en lugar de utilizar un bypass más pequeño de agua altamente sobresaturada, asegurando así un transporte de oxígeno en masa suficiente. El uso de dispositivos de oxigenación instalados en el flujo de recirculación principal genera ahorros en el consumo de electricidad porque se evita el uso de sistemas de alta presión intensivos en energía que son necesarios para alcanzar altas concentraciones de OD en pequeños flujos. Los sistemas de oxigenación de baja altura también pueden reducir la cantidad de sistemas de bombeo necesarios, ya que los sistemas de oxigenación de alta presión se colocan comúnmente en un bypass en las tuberías que van a los tanques de peces. En contraste, los dispositivos de oxigenación de baja cabeza tienden a ser comparativamente más grandes debido a su necesidad de manejar flujos más grandes y, por lo tanto, su costo inicial puede ser más alto. Ejemplos de dispositivos que pueden tratar la totalidad del flujo incluyen el oxigenador de cabeza baja (LHO) (Wagner et al. 1995), operado por gravedad cuando el agua se bombea primero a un biofiltro y una columna compacta (Summerfelt et al. 2004) , conos de oxígeno de cabeza baja, variantes del cono Speece (Ashley et al. 2008; Timmons y Losordo 1994) operaban a baja presión, los conos de eje profundo (Kruger Kaldnes, Noruega), también una variante del cono Speece diseñado para alcanzar presiones operativas más altas mediante el aumento de la presión hidrostática resultante de colocar los dispositivos por debajo de los tanques de peces y sumideros de la bomba, el oxigenador de tubo en U y sus variantes de diseño como el tubo Farrell o el sistema patentado de disolución de oxígeno (AquaMAOF, Israel) y el uso de oxigenación difusa en tanques de peces profundos (Fig. 3.5).

3.3.2 Alternativas de Biofiltración Nitrificante

Aunque los biofiltros nitrificantes continúan siendo el principal método comercialmente aceptado de eliminación de amoníaco en los RAS comerciales, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías de eliminación de nitrógeno. Algunas de estas tecnologías consideran vías biológicas alternativas para eliminar el amoníaco del agua de cultivo, mientras que otras apuntan a reemplazar o trabajar en paralelo con

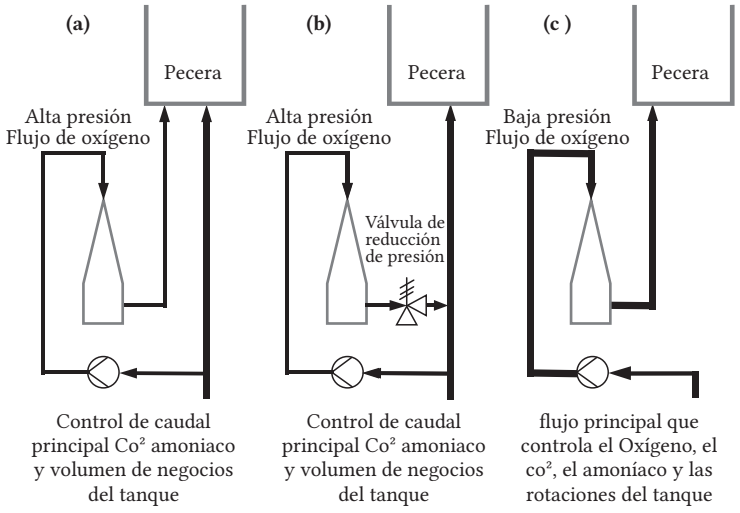


Fig. 3.5 Alternativas de transferencia de gas para recircular el agua que regresa a los tanques de peces. Si el recipiente de contacto con el gas permite la presurización, el oxígeno puede transferirse en altas concentraciones en corrientes relativamente pequeñas de alta presión (a, b). Sin embargo, el oxígeno a concentraciones más bajas puede transferirse al circuito de recirculación principal, pero para esto, el dispositivo de transferencia de oxígeno debe ser mucho más grande para manejar el flujo completo del sistema (c).

biofiltros nitrificantes para reducir las limitaciones inherentes. Estos incluyen grandes tamaños de reactores, susceptibilidad a choques, largos tiempos de arranque y peor desempeño tanto en agua fría como en sistemas marinos.

Procesos basados en Anammox

Una vía alternativa de eliminación de amoníaco biológico considerada para RAS es el proceso anammox (Tal et al. 2006), que ocurre en condiciones anaeróbicas. La oxidación anaeróbica de amonío es un proceso que elimina el nitrógeno mediante la combinación de amonío y nitrito para producir nitrógeno gaseoso (van Rijn et al. 2006). El proceso de anammox es de interés para RAS porque permite la eliminación completa de nitrógeno autótrofo, en contraste con las combinaciones tradicionales de biofiltros nitrificantes con sistemas de desnitrificación heterotróficos que requieren la adición de carbono orgánico (van Rijn et al. 2006). Además, en la vía anammox, solo la mitad del amonío liberado por el pescado se oxida aeróbicamente a nitrito (que requiere oxígeno), mientras que la otra mitad se convierte anaeróbicamente en gas nitrógeno junto con el nitrito

producido. Esto puede proporcionar ahorros en el uso de oxígeno y energía en RAS (van Rijn et al. 2006). Los prototipos del reactor Anammox se han demostrado con éxito (Tal et al. 2006, 2009), mientras que se sospecha que la actividad anammox ocurre en los sistemas de desnitrificación marina (Klas et al. 2006). El proyecto europeo FP7 DEAMNRECIRC también tuvo éxito en la creación de prototipos de reactores anammox para aplicaciones de acuicultura en agua fría y agua de mar. Sin embargo, las aplicaciones comerciales de la tecnología aún no han sido identificadas por los autores.

Eliminación Química de Amonío

Se proponen sistemas de eliminación de amonío basados en procesos de intercambio iónico y oxidación electroquímica como alternativas a los biofiltros nitrificantes. Los procesos de intercambio iónico dependen del uso de materiales adsorbentes como las zeolitas o las resinas selectivas de iones para extraer el amoniaco disuelto del agua (Lekang 2013), mientras que los procesos de oxidación electroquímica convierten el amonío en gas nitrógeno a través de una serie de reacciones de oxidación complejas (Lahav et al. 2015) En comparación, los procesos de intercambio iónico son adecuados para aguas con bajas concentraciones de iones (es decir, agua dulce), mientras que los procesos electroquímicos de oxidación química aprovechan los iones de cloruro presentes en el agua para producir especies de cloro activo que reaccionan fácilmente con el amonío (Lahav et al. . 2015) y, por lo tanto, son adecuados para aguas con mayores concentraciones de iones cloruro (es decir, aguas salobres y marinas).

Aunque los procesos de intercambio iónico no son nuevos, su aplicación en RAS se ha visto limitada por su capacidad para mantener el rendimiento a lo largo del tiempo: el material de filtración finalmente se "satura", perdiendo su capacidad de adsorción y, por lo tanto, debe regenerarse. Gendel y Lahav (2013), propusieron un enfoque novedoso para un proceso de amoníaco basado en intercambio iónico junto con un innovador proceso de regeneración de adsorbentes que utiliza oxidación electroquímica. La oxidación electroquímica del amonío es un proceso que ha recibido mayor atención en los últimos años, y varios conceptos han sido investigados y lanzados comercialmente, por ejemplo, EloxiRAS en España.

Los factores que limitan la aplicación de estas tecnologías en RAS comerciales incluyen, en el caso de procesos de intercambio iónico, bajo rendimiento económico, dificultad para regenerar grandes cantidades de materiales adsorbentes bajo demanda (Lekang 2013), la complejidad del sistema que requiere la adición de reactivos químicos, alto consumo de electricidad y un alto grado de eliminación de sólidos en suspensión

(Lahav et al. 2015), que a menudo no es práctico en RAS a gran escala. En el caso de los procesos de electrooxidación de amoníaco, la producción de especies reactivas tóxicas que requieren una eliminación activa es su limitación más importante, aunque su alto control de sólidos requiere, a menudo posible solo con filtros mecánicos presurizados, también es un desafío en RAS operando con grandes flujos y baja presión.

3.3.3 Control de Solidos Finos

Los sólidos finos son la fracción de sólidos dominante en RAS con partículas <30 µm que forman más del 90% del total de sólidos suspendidos en el agua de cultivo. Investigaciones recientes han encontrado que más del 94% de los sólidos presentes en el agua de cultivo de un RAS son <20 µm de tamaño o "finos" (Fernandes et al. 2015). La acumulación de sólidos finos ocurre principalmente cuando los sólidos más grandes evitan los filtros mecánicos (que no son 100% eficientes) y eventualmente se descomponen por bombas, fricción con las superficies y actividad bacteriana. Una vez que se reducen los tamaños de los sólidos, las técnicas tradicionales de filtración mecánica se vuelven inútiles.

En los últimos años, la producción, el control, los efectos de bienestar de los peces y los efectos de rendimiento del sistema de sólidos finos continúan siendo explorados. Los efectos de los sólidos finos sobre el bienestar fueron investigados inicialmente a través de la investigación de las pesquerías (Chen et al. 1994). Sin embargo, los efectos directos de los sólidos finos en RAS sobre el bienestar de los peces no se han investigado a fondo hasta hace poco. Sorprendentemente, el trabajo separado sobre trucha arcoíris de Becke et al. (2016) y Fernandes et al. (2015) no mostraron efectos negativos para el bienestar en sistemas con concentraciones de sólidos en suspensión de hasta 30 mg / l en ensayos de exposición de 4 y 6 semanas, respectivamente. A pesar de estos hallazgos, se conocen los efectos indirectos de la acumulación de sólidos finos en RAS (Pedersen et al. 2017) y se informa que están relacionados con la proliferación de microorganismos oportunistas (Vadstein et al. 2004; Attramadal et al. 2014; Pedersen et al. al.2017) ya que los sólidos finos proporcionan un sustrato de alta superficie para que las bacterias colonicen. Otro efecto negativo importante de la acumulación de sólidos finos es el aumento de la turbidez, que dificulta la inspección visual de los peces y puede dificultar las estrategias de control del fotoperiodo que requieren penetración de luz en la columna de agua. Las estrategias de control de sólidos finos utilizados en los RAS modernos incluyen la ozonización, el desnatado de proteínas, la flotación, la filtración por cartucho y la filtración por membrana (Couturier et al. 2009; Cripps y Bergheim 2000; Summerfelt y Hochheimer 1997; Wold y col.

2014). Desnatadores de proteínas, también conocidos como fraccionadores de espuma, también son relativamente populares entre los dispositivos de control de sólidos, especialmente en sistemas marinos (Badiola et al. 2012).

3.3.4 Ozonización

El conocimiento de la aplicación de ozono (O3) en RAS ha existido desde los años 1970 y 1980 (Summerfelt y Hochheimer 1997). Sin embargo, su aplicación no ha sido tan generalizada como otros procesos como los biofiltros nitrificantes o los filtros mecánicos (Badiola et al. 2012). Además del tratamiento con sólidos finos, el ozono, Como un poderoso oxidante, puede usarse en RAS para eliminar microorganismos, nitritos y sustancias húmicas (Gonçalves y Gagnon 2011). Los últimos años han visto un aumento en el conocimiento sobre los potenciales y las limitaciones del ozono aplicado tanto en RAS de agua dulce como marino. Es importante destacar que las dosis de ozono que se pueden lograr de manera segura para mejorar la calidad del agua en los sistemas de agua dulce y de agua de mar se han confirmado en varias publicaciones (Li et al. 2015; Park et al. 2013, 2015; Schroeder et al. 2011; Summerfelt 2003; Timmons y Ebeling 2010), con la conclusión de que las dosis de ozono por encima de los límites recomendados (1) no mejoran aún más la calidad del agua y (2) pueden causar efectos negativos para el bienestar, especialmente en los sistemas de agua de mar donde la ozonización excesiva causará la formación de oxidantes residuales tóxicos. En RAS de agua fría, se han determinado los requisitos de ozonización para lograr la desinfección completa del flujo del proceso (Summerfelt et al. 2009). La ozonización mejora el rendimiento del fitro de microscreen y minimiza la acumulación de materia disuelta que afecta el color del agua (Summerfelt et al. 2009).

Sin embargo, la ozonización excesiva puede afectar severamente a los peces de granja al causar efectos adversos, incluido el daño tisular histopatológico (Richardson et al. 1983; Reiser et al. 2010) y alteraciones en el comportamiento de alimentación (Reiser et al. 2010), así como el estrés oxidativo (Ritola et al. 2000, 2002; Livingstone 2003). Además, los subproductos de la ozonización pueden ser dañinos. El bromato es uno de estos y es potencialmente tóxico. Tango y Gagnon (2003) mostraron que los RAS marinos ozonizados tienen concentraciones de bromato que probablemente perjudiquen la salud de los peces. Reiser et al investigaron la toxicidad crónica por oxidación subletal producida por ozono (OPO) en rodaballo juvenil. (2011), mientras Good et al. Evaluaron la salud y el bienestar de la trucha arcoíris en RAS ozonizados y no ozonizados. (2011) El aumento de la trucha arcoíris al tamaño del mercado en RAS ozonizado mejoró el rendimiento de los peces sin afectar significativamente su salud y bienestar,

mientras que las altas dosis de OPO afectan el bienestar de los rodaballos juveniles.

3.3.5 Desnitrificación

En la mayoría de los sistemas de recirculación acuícola, el nitrato, el producto final de la nitrificación, tiende a acumularse. Dicha acumulación es comúnmente controlada por dilución (introduciendo nueva agua en el sistema). El control del nitrato por dilución puede ser un factor limitante para una operación RAS debido a las regulaciones ambientales, la poca disponibilidad de agua nueva, el costo de tratar las corrientes de agua entrante y efluente o los costos asociados con el enfriamiento o calentamiento del agua nueva.

La eliminación biológica de nitrato en RAS se puede lograr mediante anaerobios facultativos bacterias que utilizan una vía desamilatoria para convertir el nitrato en gas nitrógeno en presencia de carbono y nitrato como donantes de electrones (van Rijn et al. 2006). Los reactores de desnitrificación son, por lo tanto, reactores biológicos que normalmente funcionan en condiciones anaeróbicas y generalmente se dosifican con algún tipo de fuente de carbono, como etanol, metanol, glucosa, melaza, etc. La tecnología de desnitrificación ha estado en desarrollo desde la década de 1990 (van Rijn y Riviera 1990), pero su popularidad entre la industria acuícola de recirculación solo ha aumentado en los últimos años, ofreciendo soluciones innovadoras de reactores de desnitrificación.

Una de las aplicaciones más notables de los sistemas de desnitrificación en acuicultura es el RAS de 'intercambio cero' (Yogev et al.2016), que emplea la digestión anaeróbica de los biosólidos producidos en el sistema para producir ácidos grasos volátiles (AGV) que luego son utilizados por los desnitrificadores. como fuente de carbono Klas en al. (2006) desarrollaron un sistema de desnitrificación de "lodo único", donde la producción de VFA a partir de biosólidos y la desnitrificación se producen en un solo reactor mixto. Suhr y col. (2014) desarrollaron aún más el concepto de lodo único, adaptándolo para el tratamiento al final de la tubería de los efluentes de la cría de peces y agregando un paso adicional que separa la producción de VFA del reactor de desnitrificación en un tanque de hidrólisis. Estos trabajos han proporcionado información valiosa sobre las posibilidades de usar biosólidos acuícolas en lugar de costosas fuentes de carbono inorgánico para la desnitrificación. Además, Christianson et al. (2015) estudiaron la efectividad de los reactores de desnitrificación basados en azufre autotróficos como una alternativa a los reactores de desnitrificación heterotróficos convencionales. Los reactores autótrofos producen menos biomasa

(sólidos) y se puede suministrar con partículas de azufre, que son más baratas que las fuentes de carbono inorgánico convencionales.

Los VFA también son el componente precursor en la producción de biopolímeros como los polihidroalcanoatos (PHAs), utilizados para producir plásticos biodegradables (Pittmann y Steinmetz 2013). Esto podría tener potencial para que las granjas de peces que emplean procesos anaerobios de lodos activados sean parte del concepto de "biorefinería" aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales.

3.3.6 Control microbiano

Las comunidades microbianas son componentes importantes del ecosistema acuático. En los sistemas de producción acuícola, juegan un papel importante en el reciclaje de nutrientes, la degradación de la materia orgánica y el tratamiento y control de enfermedades (Zeng et al. 2017) Desarrollar RAS eficientes, productivos, biológicamente seguros y libres de enfermedades requiere una comprensión profunda de todos los procesos de soporte vital, desde el físico y químico (transferencia de gas, tratamiento térmico, ozonización, irradiación UV, ajustes de pH y salinidad) hasta procesos biológicos (nitrificación, desnitrificación y actividad heterotrófica aeróbica). Si bien los procesos físicos y químicos pueden controlarse, los sistemas de filtración biológica dependen de la interacción de las comunidades microbianas entre sí y con su entorno como consecuencia del aporte de nutrientes (salida de desechos de peces) y, como tales, no se controlan tan fácilmente (Schreier et al. 2010). Estudios recientes que utilizan herramientas moleculares no solo han permitido evaluar la diversidad microbiana en RAS, sino que también han proporcionado una idea de sus actividades que deberían conducir a una mejor comprensión de las interacciones de la comunidad microbiana. Es seguro que estos enfoques proporcionarán nuevos arreglos de procesos RAS, así como una visión de los nuevos procesos y herramientas para mejorar y monitorear estos sistemas (Schreier et al. 2010). La comprensión actual de la diversidad microbiana del biofiltro RAS en sistemas de agua dulce y marinos se basa en estudios que utilizan 16S rRNA y sondas funcionales de genes específicos o bibliotecas de genes 16S rRNA en lugar de técnicas basadas en cultivos (Tabla 3.1).

Las ideas sobre la dinámica temporal y espacial de la microbiota en RAS también siguen siendo limitado (Schreier et al. 2010), y faltan soluciones potenciales para mantener o restaurar comunidades microbianas beneficiosas en RAS (Rurangwa y Verdegem 2015). Además de una comunidad microbiana que purifica el agua, la microbiota en RAS también puede

albergar patógenos o producir compuestos que causan mal sabor (Guttman y van Rijn 2008). Dada la dificultad de tratar la enfermedad durante la operación sin afectar negativamente la microbiota beneficiosa, el manejo microbiano en RAS es más bien una necesidad desde el inicio hasta el proceso de producción completo. Los microorganismos se introducen en RAS a través de diferentes vías: agua de reposición, aire, vectores animales, piensos, cría de peces, equipo sucio y a través del personal o visitantes (Sharrer et al. 2005; Blancheton y col. 2013). Los microbios específicos también pueden, por otro lado, aplicarse intencionalmente para dirigir la colonización microbiana para mejorar el rendimiento del sistema o la salud animal (Rurangwa y Verdegem 2015).

Tabla 3.1. Actividades primarias asociadas con el RAS unidades de Biofiltración y participación de micro organismos. (From Schreier et al. 2010)

Proceso	Reacción	Microorganismo	
		Agua fresca	**Marina**
Nitrificación			
Oxidación ammonio	$NH_4^+ + 1{,}5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$	*Nitrosomonas oligotropha*	*Nitrosomonas sp.*
			Nitrosomonas cryotolerans
			Nitrosomonas europaea
			Nitrosomonas cinnybus/nitrosa
			Nitrosococcus mobilis
Oxidación Nitrito	$NO_2^- + H_2O \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + 2e^-$	*Nitrospira* spp.	
		Nitrospira marina[a]	*Nitrospira marina*[a]
		Nitrospira moscoviensis[a]	*Nitrospira moscoviensis*[a]
Desnitrificación Autotrophic	$S_2^- + 1{,}6NO_3^- + 1{,}6H^+ \rightarrow$		*Thiomicrosporia denitrificans*
(Sulfide-dependent)	$SO_4^{2-} + 0{,}8N_2(g) + 0{,}8H_2O$		*Thiothrix disciformis*[a]
			Rhodobacter litoralis[a]
			Hydrogenophaga sp.
Heterotrophic	$5CH_3COO^- + 8NO_3^- + 3H^+ \rightarrow$		*Pseudomonas fluorescens*
	$10HCO_3^- + 4N_2(g) + 4H_2O$	*Pseudomonas* sp.	*Pseudomonas stutzeri*
		Comamonas sp.	*Pseudomonas sp.*
			Paracoccus denitrificans
Dissimilatory nitrate	$No_3^- + 2H^+ + 4H_2 \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$		Various *Proteobacteria* and *Firmicutes*
Reduction to ammonia (DNRA)			
Anaerobic ammonium	$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2(g) + 2H_2O$		*Planctomycetes spp.*
Oxidation (Anammox)			*Brocadia sp.*[a]
Sulfate reduction	$SO_4^{2-} + CH_3COO^- + 3H^+ \rightarrow$ $HS^- + 2HCO_3^- + 3H^+$		*Desulfovibrio sp.,*
			Dethiosulfovibrio sp.,
			Fusibacter sp., Bacteroides sp.
Sulfide oxidation	$HS^- + 2O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + H^+$		*Thiomicrospira sp.*
Methanogenesis	$4H_2 + H^+ + HCO_3^- \rightarrow CH_4(g) + 3H_2O$		*Methanogenic Archaea [Mirzoyan and Gross, unpublished]*

[a] *Microorganismos identificados únicamente sobre la base del gen parcial 16S rRNA o secuencias de genes funcionales.*

Uno de los enfoques para inhibir la colonización de patógenos es el uso de bacterias probióticas que pueden competir por nutrientes, producir inhibidores del crecimiento o apagar la comunicación de célula a célula (detección de quórum) que permite establecerse dentro de las biopelículas (Defoirdt et al. 2007, 2008; Kesarcodi-Watson et al.2008). Las bacterias probióticas incluyen *Bacillus, Pseudomonas* (Kesarcodi-Watson et al. 2008) y *Roseobacter* spp. (Bruhn et al. 2005), y las bacterias relacionadas con estos también se han identificado en biofiltros RAS (Schreier et al. 2010) (Tabla 3.1). Para obtener la información necesaria para gestionar la estabilidad microbiana en RAS, Rojas-Tirado et al. (2017) han identificado los factores que afectan los cambios en la dinámica bacteriana en términos de su abundancia y actividad. Sus estudios muestran que la actividad bacteriana no era un parámetro predecible directo en la fase acuosa ya que los niveles de nitrato-N en RAS idénticos mostraron cambios / fluctuaciones repentinas inesperadas dentro de uno de los sistemas. Las partículas suspendidas en RAS proporcionan un área de superficie que puede ser colonizada por bacterias. A medida que aumenta la intensidad de la recirculación, se acumulan más partículas, lo que aumenta potencialmente la capacidad de carga bacteriana de los sistemas. Pedersen y col. (2017) exploraron la relación entre el área de superficie total de partículas (TSA) y la actividad bacteriana en RAS de agua dulce. Indicaron una correlación fuerte, positiva y lineal entre TSA y la actividad bacteriana en todos los sistemas con intensidad de recirculación baja a moderada. Sin embargo, la relación aparentemente dejó de existir en los sistemas con la mayor intensidad de recirculación. Esto probablemente se deba a la acumulación de nutrientes disueltos que sostienen las poblaciones bacterianas de vida libre, y / o la acumulación de coloides suspendidos y partículas finas de menos de 5 µm de diámetro, que no se caracterizaron en su estudio, pero pueden proporcionar un área de superficie significativa.

En RAS, varios compuestos químicos (principalmente nitratos y carbono orgánico) se pueden acumular en el agua. Estos sustratos químicos regulan la eco fisiología de las comunidades bacterianas en el biofiltro y tienen un impacto en su eficiencia y confiabilidad de nitrificación. Michaud y col. (2014) investigaron el cambio de la estructura de la comunidad bacteriana y la abundancia relativa de taxones importantes en dos filtros biológicos diferentes y concluyeron que la dinámica y la flexibilidad de la comunidad bacteriana para adaptarse a los cambios de agua en efluentes parecían estar relacionadas con el rendimiento del biofiltro. Uno de los aspectos clave para mejorar la confiabilidad y sostenibilidad del RAS es el manejo apropiado de las poblaciones bacterianas de biofiltros, lo que está directamente relacionado con la disponibilidad de C (carbono) (Avnimelech 1999). Cabe señalar que los RAS tienen propiedades que en realidad pueden

contribuir a la estabilización microbiana, incluido un tiempo de retención de agua prolongado y una gran superficie de biofiltros para bacterias en crecimiento, lo que podría limitar las posibilidades de proliferación de microbios oportunistas en la calidad de agua (Attramadal et al. 2012a).

Attramadal y col. (2012a) compararon el desarrollo de la comunidad microbiana en un RAS con ozonización moderada (a 350 mV) con el de un sistema de flujo convencional (FTS) para el mismo grupo de bacalao del Atlántico, Gadus morhua. Encontraron menos variabilidad en la composición bacteriana entre los tanques de peces replicados del RAS que entre los tanques del FTS. El RAS tenía una estructura común microbiana más uniforme con una mayor diversidad de especies y periódicamente una menor fracción de oportunistas. Los peces en RAS se desempeñaron mejor que su control en el FTS, a pesar de estar expuestos a una aparente calidad fisicoquímica del agua inferior. Mientras investigaba los efectos de la ozonización moderada o la radiación UV de alta intensidad en el ambiente microbiano en RAS para larvas marinas, Attramadal et al. (2012b) enfatizaron que un RAS para tales larvas probablemente no debería incluir una desinfección fuerte porque conduce a una reducción en el número de bacterias, lo que probablemente resulte en una desestabilización de la comunidad microbiana. Además, sus resultados apoyan la hipótesis de RAS como estrategia de control microbiano durante la primera alimentación de larvas de peces.

RAS y la maduración microbiana como herramientas para la selección K de comunidades microbianas fue el tema del estudio de Attramadal et al. (2014) en el que plantearon la hipótesis de que las larvas de peces criados en agua dominada por estrategas K (comunidades microbianas maduras) funcionarán mejor, porque es menos probable que se encuentren con microbios oportunistas (seleccionados por R) y desarrollen hospedadores perjudiciales. Interacciones de microbios. Los resultados de su experimento mostraron un alto potencial para aumentar la supervivencia de los peces al usar la selección K de bacterias, que es un método barato y fácil que puede usarse en todo tipo de sistemas acuícolas nuevos o existentes. Pequeños cambios en el manejo (carga orgánica y maduración del agua) del tratamiento del agua dan microbiota en tanques de peces significativamente diferentes (Attramadal et al. 2016). Por otro lado, las sustancias húmicas (HS) son compuestos orgánicos naturales, que comprenden una amplia gama de polímeros pigmentados de alto peso orgánico. Son productos finales en la degradación de compuestos orgánicos complejos y, cuando abundan, producen un color marrón o marrón oscuro típico del suelo y el agua (Stevenson 1994). En un sistema de acuicultura de descarga cero, se detectaron sustancias similares a HS en el agua de cultivo y en la

sangre de pescado (Yamin et al. 2017a). Se informó un efecto protector de HS en peces expuestos a metales tóxicos (Peuranen et al. 1994; Hammock et al. 2003) y concentraciones tóxicas de amoníaco y nitrito (Meinelt et al. 2010). Además, se proporcionaron pruebas de su efecto fungistático contra el patógeno del pescado, *Saprolengia parasitica* (Meinelt et al. 2007). En la carpa común (*Cyprinus carpio*) expuesta a (a) agua y lodos ricos en húmicos de un sistema de recirculación, (b) un ácido húmico sintético y (c) un extracto rico en húmicos derivado de Leonardita, las tasas de infección se redujeron a 14,9%, 17,0% y 18,8%, respectivamente, en comparación con una tasa de infección del 46,8% en el tratamiento de control (Yamin et al. 2017b). Así mismo, la exposición del pez guppy (*Poecillia reticulata*), infectada con la monogenea *Gyrodactylus turnbulli* y *Dactylogyrus sp.* al cultivo de agua y alimento ricos en húmicos, redujo tanto la prevalencia de infección (% de peces infectados) como la intensidad de la infección (parásitos per fi) de los dos parásitos (Yamin et al. 2017c).

Se cree que la investigación fundamental en el área de la ecología microbiana de los sistemas de reactores de nitrificación / desnitrificación en RAS puede proporcionar innovaciones que pueden alterar y/o mejorar drásticamente el rendimiento del reactor en RAS. Hasta ahora, la comunidad microbiana en los reactores sigue siendo difícil de controlar (Leonard et al. 2000, 2002; Michaud y col. 2006, 2009; Schreier y col. 2010; Rojas-Tirado y col. 2017) y muchas de las ineficiencias del sistema se originan a partir de esto (Martins et al. 2010b).

3.3.7 Eficiencia energética

La viabilidad económica de la producción de peces en un sistema de recirculación acuícola depende, en parte, de minimizar los requisitos de energía para operar tales instalaciones. Los RAS requieren una infraestructura técnica más alta que los sistemas abiertos, por lo que los costos de energía en RAS ya han sido calificados como restricciones importantes que pueden evitar que esta tecnología tenga una aplicación generalizada (Singh y Marsh 1996). De todos los costos asociados con el uso de electricidad en RAS, la ventilación y la refrigeración por agua son generalmente las más importantes. En los RAS interiores, la ventilación del edificio es importante para controlar los niveles de humedad y dióxido de carbono. Un mal control de la humedad puede provocar un rápido deterioro de las estructuras de los edificios, mientras que la acumulación de dióxido de carbono atmosférico afectará los procesos de eliminación de dióxido de carbono que operan en el RAS y causará mareos en los trabajadores. Para mantener una atmósfera aceptable dentro de las instalaciones, las plantas de ventilación o aire acondicionado están ampliamente en funcionamiento

(Gehlert et al. 2018). Estos sistemas de ventilación pueden equiparse con medidas para reducir el uso de energía. Además, para desarrollar un RAS ambientalmente sostenible, se puede asumir la energía como un parámetro clave de conducción, y en particular, la energía se puede considerar un indicador importante. El análisis de rendimiento energético del RAS ha sido realizado por Kucuk et al. (2010) para contribuir a la gestión energética en el RAS. Para mejorar el rendimiento energético del RAS, recomendaron que las condiciones de funcionamiento de los componentes, en particular, las bombas se optimicen y mejoren en función de la capacidad de producción de peces del sistema.

Para aumentar la eficiencia, los gerentes de RAS necesitan pautas y herramientas para optimizar la producción Las auditorías energéticas pueden proporcionar datos reales que pueden usarse para la toma de decisiones. Badiola y col. (2014) investigaron el consumo total de energía (kWh) de un sistema de bacalao RAS de forma continua durante 14 meses e identificaron la bomba de calor como un gran consumidor de energía de cría de peces que requieren un tratamiento térmico de alta agua. Gehlert y col. (2018) concluyeron que las unidades de ventilación ofrecían un potencial significativo para el ahorro de energía en el RAS. La mayoría de las veces, cuando los parámetros climáticos en la instalación se mantienen dentro del rango deseado, las tasas de flujo de aire pueden mantenerse en niveles bajos para ahorrar energía. Además, las medidas de ahorro de energía en el RAS pueden incluir: software con datos de rendimiento energético, fuentes de energía alternativas para calentar el agua y el uso de convertidores de frecuencia (Badiola et al. 2014).

3.4 PROBLEMAS DE BIENESTAR ANIMAL

3.4.1 Introducción

Durante la última década, el bienestar de los peces ha atraído mucha atención, y esto ha llevado a la industria acuícola a incorporar una serie de prácticas y tecnologías de cría desarrolladas específicamente para mejorar este aspecto. La neo corteza, que en los humanos es una parte importante del mecanismo neural que genera la experiencia subjetiva del sufrimiento, los peces y animales no mamíferos no la tienen, y se ha argumentado que su ausencia de peces indica que los peces no pueden sufrir. Sin embargo, una visión alternativa fuerte es que los animales complejos con comportamientos sofisticados, como los peces, probablemente tienen la capacidad de sufrir, aunque esto puede ser diferente en grado y tipo de la experiencia humana de este estado (Huntingford et al. 2006).

El Comité de Bienestar Agrícola y Animal (FAWC) del gobierno del Reino Unido ha basado sus directrices en el Marco de "Cinco Libertades", que define estados ideales en lugar de niveles específicos de bienestar aceptable (FAWC 2014). La libertad del hambre y la sed, la incomodidad, el dolor, las lesiones, las enfermedades, el miedo y la angustia, así como la libertad de expresar un comportamiento normal, nos proporciona un marco definido para evaluar los problemas de bienestar. La salud física es la medida de bienestar más universalmente aceptada y es, sin duda, un requisito necesario para un buen bienestar. En una industria competitiva, en expansión y emergente, los acuicultores que incorporan consideraciones de bienestar en sus prácticas de cría diaria pueden obtener una ventaja competitiva y un precio adicional (Olesen et al. 2010) a través de una mejor percepción del consumidor y confianza en sus productos. Grimsrud y col. (2013) proporcionaron evidencia de que existe una alta disposición a pagar, entre todos los hogares noruegos, para mejorar el bienestar del salmón atlántico de cultivo a través de una mayor resistencia a las enfermedades y los piojos del salmón, lo que puede implicar un menor uso de medicamentos y productos químicos en el proceso de producción.

En RAS intensivo, el bienestar animal está estrechamente relacionado con el rendimiento de los sistemas. En los últimos años, el bienestar animal en el RAS se ha estudiado principalmente desde la perspectiva de la calidad del agua y los efectos del hacinamiento en el rendimiento del crecimiento, los bioindicadores de estrés o el desarrollo de trastornos de la salud. El objetivo principal de la investigación del bienestar animal en el RAS ha sido construir y operar sistemas que maximicen la productividad y minimicen el estrés y la mortalidad. Los temas de interés han sido los límites de densidad de población (Calabrese et al. 2017), los límites de concentración de compuestos nitrogénicos en el agua de cría (Davidson et al. 2014), los límites de concentración de dióxido de carbono disuelto (Good et al. 2018), los efectos de la ozonización (Good et al. 2011; Reiser y col. 2011) y, en menor medida, la acumulación de compuestos recalcitrantes en el RAS (van Rijn y Nussinovitch 1997) con intercambios limitados de agua y ruido (Martins et al. 2012; Davidson et al. 2017).

3.4.2 Estrés

La respuesta al estrés en peces es una función adaptativa frente a una amenaza percibida para la homeostasis y la fisiología del estrés no necesariamente equivale a sufrimiento y disminución del bienestar (Ashley 2007) (Fig. 3.6). Las respuestas al estrés cumplen una función muy importante para preservar al individuo. Por lo tanto, las medidas de bienestar en la acuicultura se asocian en gran medida con los efectos

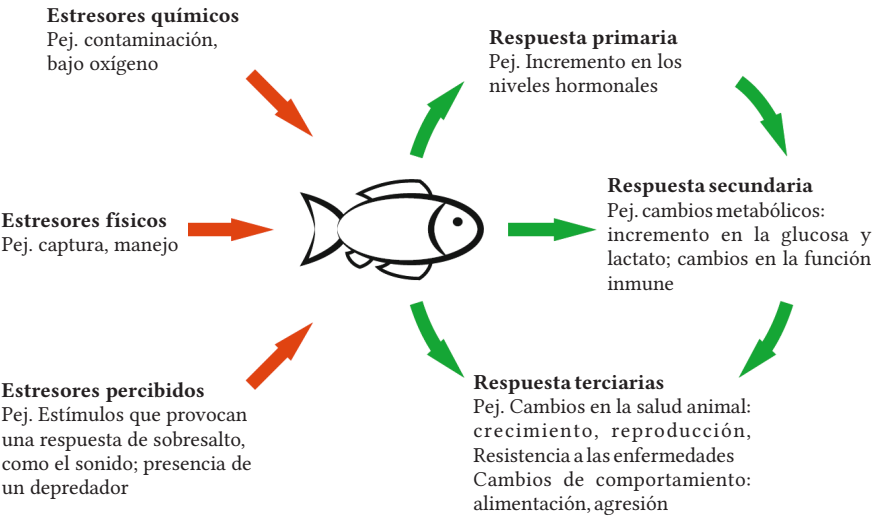


Fig. 3.6. Los factores estresantes físicos, químicos y otros pueden afectar a los peces y causar respuestas primarias, secundarias y / o de todo el cuerpo. (Después de Barton 2002)

terciarios de la respuesta al estrés que generalmente son indicativos de estrés prolongado, repetido o inevitable (Conte 2004).

La densidad de población es un factor fundamental que afecta el bienestar de los peces en la industria de la acuicultura, especialmente RAS, donde las altas densidades en entornos confinados apuntan a una alta productividad. Aunque rara vez se define, la densidad de población es el término que se usa normalmente para referirse al peso del pescado por unidad de volumen o por unidad de volumen en unidad de tiempo de flujo de agua a través del ambiente de retención (Ellis et al. 2001). El concepto de espacio mínimo para un pez es más complejo que para las especies terrestres, ya que los peces utilizan un medio tridimensional (Conte 2004).

Más allá de satisfacer las necesidades fisiológicas, la FAWC (2014) recomienda ese pez 'necesita espacio suficiente para mostrar el comportamiento más normal con un mínimo de dolor, estrés y miedo'. La densidad de población es, por lo tanto, un área que ilustra tanto la importancia de las diferencias de especies como la existencia de una compleja red de factores interactuantes que afectan el bienestar de los peces. Calabrese y col. (2017) han investigado los límites de densidad de población para el salmón del Atlántico post-smolt (*Salmosalar* L.) con énfasis en el rendimiento de la

producción y el bienestar en donde se produjeron daños finos y cataratas. observado en densidades de almacenamiento de 100 kg m3 y superiores. Sin embargo, el efecto de la densidad de población en las medidas de bienestar varía entre especies. Por ejemplo, la lubina (*Dicentrarchus labrax*) mostró mayores niveles de estrés a altas densidades, Como lo indica el cortisol, la respuesta inmune innata y la expresión de genes relacionados con el estrés (Vazzana et al. 2002; Gornati et al. 2004). Las altas densidades de población en la dorada juvenil (*S. aurata*) también producen una situación de estrés crónico, reflejada por altos niveles de cortisol, inmunosupresión y metabolismo alterado (Montero et al. 1999). En contraste, los charr árticos (*Salvelinus alpinus*) se alimentan y crecen bien cuando se almacenan a altas densidades, mientras que muestran una ingesta de alimentos deprimida y tasas de crecimiento a bajas densidades (Jorgensen et al. 1993).

La dieta también puede jugar un papel importante en la sensibilidad al estrés. El pez gato africano (*Clarias gariepinus*) que recibió una dieta con una alta suplementación de ácido ascórbico (vitamina C) durante el desarrollo temprano mostró una menor sensibilidad al estrés (Merchie et al. 1997). Por otro lado, la carpa común (*Cyprinus carpio*), alimentada con grandes dosis de vitamina C, mostró un aumento más pronunciado del cortisol (una hormona esteroidea liberada con estrés) en respuesta al estrés en comparación con los niveles recomendados de vitamina (Dabrowska et al. al.1991). Tort y col. (2004) han demostrado que una dieta modificada que proporciona una dosis suplementaria de vitaminas y minerales traza para ayudar al sistema inmunitario puede ayudar a reducir algunos de los efectos del síndrome de la enfermedad de invierno. Ashley (2007) revisa otras enfermedades comunes de la acuicultura relacionadas con el bienestar y el estrés de los animales.

3.4.3 Acumulación de sustancias en el agua de proceso

Los RAS intensivos y de "descarga cero" ofrecen ventajas medioambientales significativas. Sin embargo, el cultivo de peces en agua continuamente reciclada plantea la cuestión de si las sustancias liberadas por los peces en el agua pueden acumularse, lo que resulta en una disminución de las tasas de crecimiento y un bienestar deteriorado. La existencia de retraso del crecimiento en la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) al comparar el crecimiento, el comportamiento de alimentación y la respuesta al estrés de los peces cultivados en el RAS con diferentes niveles de sustancias acumuladas (TAN, NO2-N y NO3-N, ortofosfatos-P) fue investigado por Martins et al. (2010a). Los resultados mostraron que los individuos grandes tenían una tendencia hacia el retraso del crecimiento en el RAS de mayor acumu-

lación, mientras que los individuos pequeños, por el contrario, parecen crecer mejor en dichos sistemas basados en altos niveles de glucosa en sangre como un indicador de estrés. Un estudio similar realizado por el mismo autor sobre embriones de carpa y larvas (Martins et al. 2011) encontró resultados que sugieren que la concentración de sustancias (ortofosfatos-P, nitrato, arsénico y cobre) probablemente afectaría el desarrollo. A pesar de estos hallazgos, los autores afirman que, en general, el porcentaje de mortalidad y deformidades registradas en el estudio fue relativamente bajo en comparación con otros estudios. En ambos estudios, los autores utilizaron sistemas con tasas de intercambio de agua muy limitadas con la ayuda de reactores de desnitrificación (30 litros de agua nueva por Kg de alimento por día). De manera similar, la acumulación de hormonas en el RAS de salmónidos de agua fría ha sido estudiada por Good et al. 2014, 2017). Su investigación en 2014 no encontró una relación entre la tasa de intercambio de agua y la acumulación de hormonas (excepto la testosterona) ni un vínculo entre la acumulación de hormonas y la maduración precoz en el salmón del Atlántico, pero se sugirió un estudio adicional. Su estudio en 2017 se centró en el uso de la ozonización para la reducción de hormonas en el mismo RAS, con resultados no concluyentes con respecto a la acumulación de hormonas esteroides, pero con una reducción positiva de estradiol por ozono.

Por otro lado, la acumulación de sustancias húmicas en RAS de "intercambio cero" ha demostrado tener un efecto protector contra las infecciones bacterianas (Yamin et al.2017a) y ectoparásitos (Yamin et al. 2017b). También se ha demostrado que los ácidos húmicos reducen la toxicidad por amoníaco y nitrito (Meinelt et al. 2010). Esto tiene implicaciones para el RAS que funciona con ozonización, ya que el ozono puede mejorar la calidad del agua al tiempo que sacrifica los efectos aparentemente beneficiosos de las sustancias húmicas.

3.3.1 Salud y comportamiento

Las características fundamentales del buen bienestar son buena salud y ausencia de enfermedades y, con respecto a la acuicultura, buena productividad (Turnbull y Kadri 2007; Volpato y col. 2007). Si bien la salud física de un animal es fundamental para el buen bienestar (Ashley 2007; Duncan 2005), el hecho de que un animal esté sano no significa necesariamente que su estado de bienestar sea adecuado. Por lo tanto, el bienestar es un concepto más amplio y general que el concepto de salud. Las medidas fisiológicas y de comportamiento están intrínsecamente vinculadas y dependen unas de otras para una interpretación correcta con respecto al bienestar (Dawkins 1998). El comportamiento de los animales y, en nuestro

caso, de los peces, representa una reacción al medio ambiente tal como lo perciben los peces y, por lo tanto, el comportamiento es un elemento clave del bienestar de los peces. Los cambios en el comportamiento de forrajeo, la actividad de ventilación branquial, la agresión, el comportamiento de natación individual y grupal, los comportamientos estereotípicos y anormales se han relacionado con estresores agudos y crónicos en la acuicultura y, por lo tanto, pueden considerarse como indicadores probables de mal bienestar (Martins et al. 2011) Los indicadores de bienestar conductual tienen la ventaja de ser rápidos y fáciles de observar y, por lo tanto, son buenos candidatos para su uso "en la granja". Ejemplos de comportamiento que se usan comúnmente como indicadores de bienestar son los cambios en el comportamiento de anticipación de alimentos, la ingesta de alimento, la actividad de natación y las tasas de ventilación (Huntingford et al. 2006). Sin embargo, Barreto y Volpato (2004) advierten el uso de la frecuencia de ventilación como un indicador de estrés en los peces porque, aunque la frecuencia de ventilación es una respuesta muy sensible a las perturbaciones, es de uso limitado porque no refleja la gravedad del estímulo.

3.4.5 Ruido

Los peces de cultivo se cultivan durante largos períodos de tiempo en los mismos tanques del mismo color y la misma forma y se exponen a los mismos ruidos de fondo potencialmente dañinos (Martins et al. 2012). Los sistemas de acuicultura intensiva y particularmente los sistemas de recirculación utilizan equipos como aireadores, bombas de aire y agua, sopladores y sistemas de filtración que aumentan inadvertidamente los niveles de ruido en los tanques de cultivo de peces. Los niveles de sonido y las frecuencias medidas dentro de los sistemas de acuicultura intensiva están dentro del rango de la audición de peces, pero los efectos específicos de las especies del ruido de producción acuícola no están bien definidos (Davidson et al. 2009).

Bart y col. (2001) encontraron que los niveles medios de presión sonora de banda ancha (SPL) diferían entre varios sistemas de acuicultura intensiva. En su estudio, un nivel de sonido de 135 dB re Se midió 1 µPa en un estanque de tierra cerca de un aireador en funcionamiento, mientras que los grandes tanques de fibra de vidrio (14 m de diámetro) dentro de un sistema de recirculación tenían los SPL más altos de 153 dB re 1 µPa.

Los estudios de campo y de laboratorio han demostrado que el comportamiento y la fisiología de los peces pueden verse afectados negativamente por el sonido intenso. Terhune y col. (1990) han observado una disminu-

ción en el crecimiento y las tasas de rendimiento del salmón del Atlántico, Salmo salar, en tanques de fibra de vidrio que tenían niveles de sonido bajo el agua de 2–10 dB re 1μPa más alto en 100–500 Hz que en tanques de concreto. Por lo tanto, la exposición crónica al ruido de la producción acuícola podría causar un mayor estrés, tasas de crecimiento reducidas y eficiencia de conversión alimenticia y una disminución de la supervivencia. Sin embargo, Davidson et al. (2009) encontraron que después de 5 meses de exposición al ruido, no se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos para el peso medio, la longitud, las tasas de crecimiento específicas, el factor de condición, la conversión alimenticia o la supervivencia de la trucha arco iris, *Oncorhynchus mykiss*. Hallazgos similares son descritos por Wvysocki et al. (2007) Sin embargo, estos hallazgos no deberían generalizarse en todas las especies de peces cultivados, ya que muchas especies, incluidos los peces gato y los ciprínidos, tienen una sensibilidad auditiva mucho mayor que la trucha arco iris y podrían verse afectados de manera diferente por el ruido. Por ejemplo, Papoutsoglou et al. (2008) proporcionaron evidencia inicial de que la transmisión de música en condiciones específicas de cría podría tener efectos potenciadores en el rendimiento del crecimiento de *S. aurata*, al menos en tamaños de peces específicos. Además, los efectos musicales observados en varios aspectos de la fisiología del pescado (por ejemplo, enzimas digestivas, composición de ácidos grasos y neurotransmisores cerebrales) implican que cierta música podría proporcionar una mejora aún mayor en el crecimiento, la calidad, el bienestar y la producción.

3.5 Desafíos de escalabilidad en RAS

Los RAS son operaciones intensivas en capital, que requieren un alto gasto de financiación en equipos, infraestructura, sistemas de tratamiento de fluidos e influyentes, ingeniería, construcción y gestión. Una vez que se construye la granja RAS, también se necesita capital de trabajo hasta que se logren cosechas y ventas exitosas.

Los gastos operativos también son sustanciales y se componen principalmente de costos fijos tales como renta, intereses sobre préstamos, depreciación y costos variables tales como alimento para peces, semillas (alevinos o huevos), mano de obra, electricidad, oxígeno técnico, tampones de pH, electricidad, ventas / marketing, costos de mantenimiento etc.

Al comparar la productividad y la economía, RAS competirá invariablemente con otras formas de producción de pescado e incluso otras fuentes de producción de proteínas para el consumo humano. Es probable que esta competencia ejerza una presión a la baja sobre el precio de venta de los

peces, que a su vez debe ser lo suficientemente alta como para hacer que un negocio RAS sea rentable. Como en otras formas de producción acuícola, alcanzar economías de escala más altas es generalmente una forma de reducir el costo de producción y, por lo tanto, obtener acceso a los mercados. Algunos ejemplos de reducción en los costos de producción que se pueden lograr con instalaciones más grandes son:

1. Reducción de los costos de transporte en pedidos a granel de alimentos, productos químicos, oxígeno.
2. Descuentos en la compra de grandes cantidades de equipos.
3. Acceso a tarifas de electricidad industrial.
4. Automatización de procesos agrícolas, tales como monitoreo y control de procesos, alimentación, cosecha, sacrificio y procesamiento.
5. Maximización del uso de mano de obra: se necesitaba la misma mano de obra para cuidar 10 toneladas de pescado que se necesitaba para cuidar 100 toneladas de pescado o más.

Tras el aumento de las economías de escala en el sector de la acuicultura en red neta, se están desarrollando RAS más grandes en escalas no consideradas hace una década. La última década ha visto la construcción de instalaciones con capacidades de producción de miles de toneladas por año, y este aumento de tamaño de las instalaciones de RAS está trayendo nuevos desafíos técnicos, que se exploran en la siguiente sección.

3.5.1 Hidrodinámica y Transporte de Agua

El control adecuado de las condiciones hidrodinámicas en los tanques de peces es esencial para garantizar una calidad de agua uniforme y un transporte adecuado de sólidos hacia las salidas del tanque (Masaló2008; Oca y Masalo 2012). Los tanques que no son capaces de arrojar metabolitos lo suficientemente rápido tendrán menos capacidad de carga. Garantizar un rendimiento hidrodinámico adecuado en los tanques de peces es un tema importante de investigación en ingeniería acuícola que ha ayudado a la industria a diseñar y operar tanques de diferentes formas y tamaños. Sin embargo, el aumento del tamaño de los tanques utilizados en los RAS comerciales plantea nuevos desafíos de ingeniería a los diseñadores y operadores. Se están realizando investigaciones recientes para optimizar las características hidrodinámicas en grandes tanques octogonales utilizados para la producción de smolts de salmón (Gorle et al.2018), mediante el estudio del efecto de la biomasa de peces, la geometría y las estructuras de entrada y salida en tanques grandes utilizados en las instalaciones de smolt noruegos. Del mismo modo, Summerfelt et al. (2016) encontraron una tendencia hacia una tasa de carga de alimentación

decreciente por flujo unitario en tanques modernos en comparación con los tanques construidos hace más de una década en las instalaciones de smolt noruegas. Una carga de alimentación reducida resulta efectivamente en una mejor calidad del agua del tanque ya que el agua de recirculación se trata a una velocidad más rápida, evitando la acumulación de metabolitos y el agotamiento de oxígeno en el tanque aún más en comparación con los tanques más antiguos que operaban con cargas de alimentación más altas. El trabajo futuro probablemente proporcionará más información sobre la hidrodinámica de tanques con más de 1000 m3 de volumen. Otros ejemplos de tanques enormes que se están utilizando actualmente son los tanques utilizados en los sistemas RAS 2020 (Kruger, Dinamarca) o el concepto Niri (Niri, Noruega). La adopción de estos nuevos conceptos utilizando tanques más grandes desempeñará un papel vital en su rentabilidad, siempre que se logren las condiciones hidrodinámicas adecuadas.

3.5.2 Riesgo de Pérdida de Inventarios.

En RAS, las condiciones de cría intensivas pueden conducir a la pérdida repentina y catastrófica de peces si el sistema falla. Las fuentes de falla del sistema pueden incluir fallas mecánicas de los sistemas de bombeo y equipos RAS, cortes de energía, pérdida de sistemas de oxigenación / aireación, acumulación y liberación de sulfuro de hidrógeno, accidentes operacionales y más. Estos riesgos y soluciones a ellos deben identificarse e incorporarse a los procedimientos operativos.

El tamaño creciente de las operaciones RAS también puede significar un mayor riesgo de pérdida financiera si se produce una pérdida catastrófica de pescado. Por otro lado, las medidas de mitigación de riesgos y la redundancia del sistema también pueden aumentar el costo de un proyecto RAS y, por lo tanto, los diseñadores e ingenieros deben lograr un equilibrio entre estos elementos.

Además de los informes de la industria y los medios, se ha realizado poca investigación académica sobre el riesgo de las empresas comerciales de RAS. Badiola y col. (2012) encuestó granjas RAS y analizó los principales problemas técnicos, descubriendo que el diseño deficiente del sistema, los problemas de calidad del agua y los problemas mecánicos fueron los principales elementos de riesgo que afectaron la viabilidad de RAS.

3.5.3 Económicos

El debate sobre la viabilidad económica de RAS se centra principalmente en los altos costos iniciales de capital de recirculación de las granjas

acuícolas y el largo tiempo de espera antes de que los peces estén listos para ser comercializados, así como la percepción de que las granjas RAS tienen altos costos operativos. De Ionno y col. (2007) estudiaron el desempeño comercial de las granjas RAS, concluyendo que la viabilidad económica aumenta con la escala de la operación. Según este estudio, las granjas de menos de 100 toneladas por año de capacidad de producción son solo marginalmente rentables en el contexto australiano donde se realizó el estudio. Timmons y Ebeling (2010) también ofrecen un caso para lograr grandes economías de escala (del orden de la magnitud de miles de toneladas de producción por año) que permiten la reducción de los costos de producción a través de proyectos de integración vertical, como la inclusión de instalaciones de procesamiento, criaderos o fábricas de piensos. Liu y col. (2016) estudiaron el desempeño económico de una granja teórica RAS con una capacidad de 3300 toneladas por año, en comparación con una granja de corrales neta tradicional de la misma capacidad. En esta escala, la operación RAS alcanza costos de producción similares en comparación con la granja neta de corrales, pero la mayor inversión de capital duplica el período de recuperación en comparación, incluso cuando los peces de la granja RAS se venden a un precio superior. En el futuro, las licencias costosas y estrictas que requieren un buen desempeño ambiental pueden aumentar la viabilidad de RAS como opción competitiva para la producción de salmón del Atlántico.

3.5.4. Manejo de los Peces

En las granjas terrestres, a menudo se requiere el manejo de peces por varias razones: para separar los peces en clases de peso, para reducir las densidades de población, para transportar peces a través de los departamentos de cultivo (es decir, desde un vivero a un departamento de cultivo) o para cosechar peces cuando Están listos para el mercado. Según Lekang (2013), los peces se manejan de manera más efectiva con métodos activos Como las bombas de peces y también con métodos pasivos como el uso de señales visuales o químicas que permiten que los peces se muevan de un lugar en la granja al siguiente.

Summerfeltet al. (2009) estudió varios medios para amontonar y cosechar salmónidos de grandes tanques circulares utilizando drenes dobles tipo Cornell. Las estrategias incluyeron el hacinamiento de peces con cerqueros, los congestionadores de almejas y el pastoreo de peces entre tanques aprovechando su respuesta de evitación innata al dióxido de carbono. Las técnicas de recolección incluyeron la extracción del pescado a través del puerto de descarga de la pared lateral de un tanque de doble drenaje tipo Cornell o el uso de un puente aéreo para levantar el pescado lleno de gente

a una caja de desagüe. AquaMAOF (Israel) emplea veredas y tanques que comparten una pared común para transferir pasivamente los peces a través de la granja, y la recolección se lleva a cabo utilizando un pescalator (bomba de tornillo de Arquímedes) al final de una vereda. El concepto RAS2020 de Kruger (Dinamarca) utiliza niveladoras de barra / aglomeradoras instaladas permanentemente en un tanque de alcantarilla circular o en forma de rosquilla para mover y amontonar los peces sin la necesidad de bombas de peces.

A pesar de los continuos desarrollos sobre este tema, el tamaño creciente de las granjas RAS mantendrá a los diseñadores y operadores desafiantes sobre cómo manejar los peces de manera segura, económica y sin estrés. La amplia gama de diseños, especies en producción e intensidad de operación de las granjas RAS puede dar lugar a diversas y novedosas tecnologías de transporte y captura de peces.

3.6 RAS y ACUAPONIA

Los sistemas acuapónicos son una rama de la tecnología de recirculación de la acuicultura en la que se incluyen cultivos de plantas para diversificar la producción de un negocio, para proporcionar capacidad de filtración de agua adicional o una combinación de ambos. Como una rama de RAS, los sistemas acuapónicos están sujetos a los mismos fenómenos físicos, químicos y biológicos que ocurren en RAS. Por lo tanto, los mismos fundamentos de la ecología del agua, la mecánica de los fluidos, la transferencia de gases, la depuración del agua, etc. se aplican en términos más o menos iguales a la acuaponía, con la excepción del control de calidad del agua, ya que las plantas y los peces pueden tener requisitos específicos y diferentes.

Las realidades económicas fundamentales de RAS y acuaponía también están relacionadas. Ambos las tecnologías son intensivas en capital y altamente técnicas y se ven afectadas por las economías de escala, el diseño apropiado de los componentes, la dependencia de las condiciones del mercado y la experiencia de los operadores.

3.6.1 Bienestar

En los sistemas acuapónicos, la absorción de nutrientes debe maximizarse para la producción saludable de biomasa vegetal, pero sin descuidar las mejores condiciones de bienestar para los peces en términos de calidad del agua (Yildiz et al.2017). Las medidas para reducir los riesgos de introducción o propagación de enfermedades o infecciones y para aumentar la

bioseguridad en acuaponía también son importantes. También se deben tener en cuenta los posibles impactos de los aleloquímicos, es decir, los químicos liberados por las plantas. Además, se debe considerar cuidadosamente el efecto de la digestibilidad de la dieta, el tamaño de partícula de las heces y la relación de sedimentación en la calidad del agua. Todavía existe una falta de conocimiento sobre la relación entre los niveles apropiados de minerales que necesitan las plantas y el metabolismo, la salud y el bienestar de los peces (Yildiz et al. 2017), lo que requiere más investigación.

3.6.2 Diversidad microbiana y control

Como se mencionó anteriormente en el capítulo, la acuaponía combina un sistema de recirculación acuícola con una unidad hidropónica. Una de sus características más importantes es la dependencia de las bacterias y sus productos metabólicos. Además, la secta. 3.2.6. Discutió la importancia de las comunidades microbianas y su control en RAS. Las bacterias sirven como puente que conecta los excrementos de pescado, que tienen una alta concentración de amonio, con el fertilizante de plantas, que debería ser una combinación de bajo contenido de amonio y alto contenido de nitrato (Somerville et al. 2014). Como los sistemas acuapónicos pueden tener diferentes subunidades, es decir, tanques de peces, biofiltros, filtros de tambor, tanques de sedimentación y unidades hidropónicas, cada uno con diferentes diseños posibles y diferentes condiciones óptimas, las comunidades microbianas en estos componentes pueden diferir considerablemente. Esto proporciona un tema interesante de investigación con el objetivo final de mejorar los procesos de gestión del sistema. Schmautz y col. (2017) intentaron caracterizar a la comunidad microbiana en diferentes áreas de los sistemas acuapónicos. Llegaron a la conclusión de que las heces de peces contenían una comunidad separada dominada por bacterias del género *Cetobacterium*, mientras que las muestras de raíces de plantas, biofiltro y perifiton eran más similares entre sí, con comunidades bacterianas más diversas. Las muestras de biofiltro contenían grandes cantidades de Nitrospira (3,9% de la comunidad total) que se encontraron solo en pequeñas cantidades en el perifiton o en las raíces de las plantas.

Por otro lado, se encontraron solo pequeños porcentajes de Nitrosomonadales (0,64%) y Nitrobacter (0,11%) en las mismas muestras. Este segundo grupo de organismos se prueba comúnmente por su presencia en los sistemas de acuaponía, ya que se los considera principalmente responsables de la nitrificación (Rurangwa y Verdegem 2015; Zoo et al. 2016); Nitrospira se ha descrito recientemente como un nitrificador total (Daims et al. 2015), pudiendo convertir directamente el amonio en nitrato en el sistema. El dominio de Nitrospira es, por lo tanto, una novedad en

tales sistemas y podría correlacionarse con una diferencia en la configuración básica (Graber et al. 2014).

Schmautz y col. (2017) también enfatizaron que la mayor presencia de Nitrospira no se correlaciona necesariamente con una mayor actividad de estos organismos en el sistema, ya que no se midieron sus actividades metabólicas. Además, muchas especies de bacterias y coliformes están inherentemente presentes en biofiltros de recirculación acuapónica que realizan transformaciones de materia orgánica y desechos de peces. Esto implica la presencia de muchos microorganismos que pueden ser patógenos para las plantas y los peces, así como para las personas. Para este propósito, algunos microorganismos se han considerado indicadores de seguridad para los productos y la calidad del agua en el sistema (Fox et al. 2012). Algunos de estos indicadores de seguridad son *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. Por lo tanto, recientemente se ha llevado a cabo una investigación muy necesaria para determinar la seguridad microbiana de los productos de acuaponía (Fox et al. 2012; Sirsat y Neal 2013). Munguia-Fragozo et al. Han identificado una dirección futura para el análisis de la actividad microbiana en acuaponía. (2015), quienes revisaron las tecnologías Omic para el análisis de la comunidad microbiana. Llegaron a la conclusión de que el análisis de meta genómica y metatranscriptómica será crucial en futuros estudios de diversidad microbiana en biosistemas acuapónicos.

1. Desde un período de consolidación tecnológica hasta una nueva era de implementación industrial, la tecnología RAS se ha desarrollado considerablemente en las últimas dos décadas. Los últimos años han visto un aumento en el número y la escala de recirculación de granjas acuícolas. Con el aumento en la aceptación de la tecnología, siguen apareciendo mejoras sobre los enfoques de ingeniería tradicionales, innovaciones y nuevos desafíos técnicos.
2 Acuaponía combina un sistema de recirculación acuícola con una unidad hidropónica. Los RAS son sistemas complejos de producción acuática que involucran una variedad de interacciones físicas, químicas y biológicas.
3. El oxígeno disuelto (OD) es generalmente el parámetro de calidad del agua más importante en los sistemas acuáticos intensivos. Sin embargo, la adición de oxígeno suficiente al agua de cría se puede lograr de manera relativamente simple y, por lo tanto, el control de otros parámetros del agua se vuelve más desafiante.
4. Las Altas concentraciones de dióxido de carbono disuelto (CO2) tienen un efecto negativo en el crecimiento de los peces. La eliminación de CO2 del agua a concentraciones inferiores a 15 mg / L es un desafío debido a

su alta solubilidad y la limitada eficiencia de los equipos de desgasificación.

5. El amonío se ha tratado tradicionalmente en sistemas de recirculación con biofiltros nitrificantes. Se están explorando algunas tecnologías emergentes Como alternativas a la eliminación de amonío.
6. Los biosólidos en RAS se originan a partir de alimento para peces, heces y biopelículas y son uno de los parámetros más críticos y difíciles de controlar la calidad del agua. El enfoque más común es un sistema de tratamiento de múltiples pasos donde los sólidos de diferentes tamaños y eliminados mediante diferentes mecanismos.
7. El ozono, como un poderoso oxidante, puede usarse en RAS para eliminar microorganismos, nitritos y sustancias húmicas. La ozonización mejora el rendimiento del fitro de microscreen y minimiza la acumulación de materia disuelta que afecta el color del agua.
8. Los reactores de desnitrificación son reactores biológicos que generalmente funcionan en condiciones anaeróbicas y generalmente se dosifican con algún tipo de fuente de carbono, como etanol, metanol, glucosa y melaza. Una de las aplicaciones más notables de los sistemas de desnitrificación en acuicultura es el RAS de "intercambio cero".
9. En los sistemas de producción acuícola, las comunidades microbianas juegan un papel importante en el reciclaje de nutrientes, la degradación de la materia orgánica y el tratamiento y control de enfermedades. El papel de la desinfección del agua en RAS está siendo desafiado por la idea de usar agua madura microbiana para controlar los patógenos oportunistas.
10. En RAS intensivo, el bienestar animal está estrechamente relacionado con el rendimiento de los sistemas. El objetivo principal de la investigación del bienestar animal en RAS ha sido construir y operar sistemas que maximicen la productividad y minimicen el estrés y la mortalidad.

REFERENCIAS

Altinok I, Grizzle JM (2004) Excretion of ammonia and urea by phylogenetically diverse fish species in low salinities. Aquaculture 238:499–507. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.06.020

Ashley, PJ (2007). Fish welfare: current issues in aquaculture. Appl Anim Behav Sci 104 (2–4):199–235. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2006.09.001

Ashley KI, Mavinic DS, Hall KJ (2008) Oxygenation performance of a laboratory-scale Speece Cone hypolimnetic aerator: preliminary assessment. Can J Civ Eng 35:663–675. https://doi.org/10.1139/L08-011

Attramadal K, Salvesen I, Xue R, Øie G, Størseth TR, Vadstein O, Olsen Y (2012a) Recirculation as a possible microbial control strategy in the

production of marine larvae. Aquac Eng 46:27–39. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.10.003

Attramadal K, Øie G, Størseth TR, Morten OA, Vadstein O, Olsen Y (2012b) The effects of moderate ozonation or high intensity UV-irradiation on the microbial environment in RAS for marine larvae. Aquaculture 330–333:121–129. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.042

Attramadal KJK, Truong TMH, Bakke I, Skjermo J, Olsen Y, Vadstein O (2014) RAS and microbial maturation as tools for K-selection of microbial communities improve survival in cod larvae. Aquaculture 432:483–490. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.052

Attramadal K, Minniti G, Øie G, Kjørsvik E, Østensen M-A, Bakke I, Vadstein O (2016) Microbial maturation of intake water at different carrying capacities affects microbial control in rearing tanks for marine fish larvae. Aquaculture 457:68–72. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.02.015

Avnimelech Y (1999) Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. Aquacul- ture 176(3–4):227–235. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X

Badiola M, Mendiola D, Bostock J (2012) Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges. Aquac Eng 51:26–3

Badiola M, Basurko OC, Gabiña G, Mendiola D (2014) Energy audits in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): as a way forward to guarantee sustainability. AE2014 conference paper. https://doi.org/10.13140/2.1.1218.5604

Barreto RE, Volpato GL (2004) Caution for using ventilatory frequency as an indicator of stress in fish. Behav Process 66:43–51. https://doi.org/10.1016/j.beproc.2004.01.001

Bart AN, Clark J, Young J, Zohar Y (2001) Underwater ambient noise measurements in aquaculture systems: a survey. Aquac Eng 25:99–110. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(01)00074-7

Barton B (2002) Stress in fishes: a diversity of responses with particular reference to changes in circulating corticosteroids. Integr Comp Biol 42:517–525

Becke C, Steinhagen D, Schumann M, Brinker A (2016) Physiological consequences for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) of short-term exposure to increased suspended solid load. Aquac Eng. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.11.001

Blancheton JP, Attramadal KJK, Michaud L, Roque d'Orbcastel E, Vadstein O (2013) Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquac Eng 53:30–39. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.009

Bock E, Sundermeyer-Klinger H, Stackerbrandt E (1983) New facultative

lithoatotrophic nitrinte-oxidizing bacteria. Arch Microbiol 136:281–284. https://doi.org/10.1007/BF00425217

Bovendeur J, Eding EH, Henken AM (1987) Design and performance of a water recirculation system for high-density culture of the African catfish, Clarias-gariepinus (Burchell 1822). Aquaculture 63:329–353. https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90083-4

Browdy CL, Ray AJ, Leffler JW, Avnimelech Y (2012) Biofloc-based aquaculture systems. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture production systems. Wiley, Oxford

Bruhn JB, Nielsen KF, Hjelm M, Hansen M, Bresciani J, Schulz S, Gram L (2005) Ecology, inhibitory activity, and morphogenesis of a marine antagonistic bacterium belonging to the Roseobacter clade. Appl Environ Microbiol 71:7263–7270. https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7263-7270.2005

Calabrese S, Nilsen TO, Kolarevic J, Ebbesson LOE, Pedrosa C, Fivelstad S, Hosfeld C, Stefansson SO, Terjesen BF, Takle H, Martins CIM, Sveier H, Mathisen F, Imsland AK, Handeland SO (2017) Stocking density limits for post-smolt Atlantic salmon (Salmo salar L.) with emphasis on production performance and welfare. Aquaculture 468(1):363–370. https://doi.org/10.1016/j. aquaculture.2016.10.041

Camargo JA, Alonso A (2006) Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. Environ Int 32:831–849. https://doi.org/10.1016/j. envint.2006.05.002

Chen S, Coffin DE, Malone RF (1994) Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. In: Timmons MB, Losordo TM (eds) Aquaculture water reuse systems: engineering design and management. Elsevier, Amsterdam, pp 61–100

Christianson L, Lepine C, Tsukuda S, Saito K, Summerfelt S (2015) Nitrate removal effectiveness of fluidized sulfur-based autotrophic denitrification biofilters for recirculating aquaculture systems. Aquac Eng:10–18. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.002

Colt J (1991) Aquacultural production systems. J Anim Sci 69:4183–4192. https://doi.org/10.2527/1991.69104183x

Colt J (2006) Water quality requirements for reuse systems. Aquac Eng 34(3):143–156. https://doi. org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.011

Colt J, Bouck G (1984) Design of packed columns for degassing. Aquac Eng 3:251–273. https://doi.org/10.1016/0144-8609(84)90007-4

Colt JE, Watten BJ (1988) Applications of pure oxygen in fish culture. Aquac Eng 7:397–441. https://doi.org/10.1016/0144-8609(88)90003-9

Conte FS (2004) Stress and the welfare of cultured fish. Appl Anim Behav Sci 86:205–223. https://doi.org/10.1016/j.applanim.2004.02.003

Couturier M, Trofimencoff T, Buil JU, Conroy J (2009) Solids removal at a recirculating salmon- smolt farm. Aquac Eng 41:71–77.

https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.05.001
Cripps SJ, Bergheim A (2000) Solids management and removal for intensive land-based aquacul- ture production systems. Aquac Eng 22:33–56. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(00)00031-5
Crossley PL (2004) Sub-irrigation in wetland agriculture. Agric Hum Values 21(2/3):191–205. https://doi.org/10.1023/B:AHUM.0000029395.84972.5e. Accessed 18 Dec 2017
Dabrowska H, Dabrowski K, Meyerburgdorff K, Hanke W, Gunther KD (1991) The effect of large doses of Vitamin-C and magnesium on stress responses in Common Carp, *Cyprinus Carpio*. Comp Biochem Physiol A 99:681–685. https://doi.org/10.1016/0300-9629(91)90150-B
Daims H, Lebedeva EV, Pjevac P, Han P, Herbold C, Albertsen M, Jehmlich N, Palatinszky M, Vierheilig J, Bulaev A, Kirkegaard RH, von Bergen M, Rattei T, Bendinger B, Nielsen PH, Wagner M (2015) Complete nitrification by Nitrospira bacteria. Nature 528:504–509. https://doi.org/10.1038/nature16461
Davidson J, Summerfelt S (2004) Solids flushing, mixing, and water velocity profiles within large (10 and 150 m3) circular "Cornell-type" dual-drain tanks. Aquac Eng 32:245–271. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.03.009
Davidson J, Bebak J, Mazik P (2009) The effects of aquaculture production noise on the growth, condition factor, feed conversion, and survival of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Aqua- culture 288(3–4):337–343. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.11.037
Davidson J, Good C, Welsh C, Summerfelt S (2014) Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* within water recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 59:30–40. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.01.003
Davidson J, Good C, Williams C, Summerfelt S (2017) Evaluating the chronic effects of nitrate on the health and performance of post-smolt Atlantic salmon Salmo salar in freshwater recirculation aquaculture systems. Aquac Eng 79:1–8
Dawkins MS (1998) Evolution and animal welfare. Q Rev Biol 73:305–328. https://doi.org/10.1086/420307
De Carvalho RAPLF, Lemos DEL, Tacon AGJ (2013) Performance of single-drain and dual-drain tanks in terms of water velocity profile and solids flushing for in vivo digestibility studies in juvenile shrimp. Aquac Eng 57:9–17. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.004
De Ionno PN, Wines GL, Jones PL, Collins RO (2007) A bioeconomic evaluation of a commercial scale recirculating finfish growout system—An Australian perspective. Aquaculture 259 (1):315–327. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.047

Defoirdt T, Boon N, Sorgeloos P, Verstraete W, Bossier P (2007) Alternatives to antibiotics to control bacterial infections: luminescent vibriosis in aquaculture as an example. Trends Biotechnol 25:472–479. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.08.001

Defoirdt T, Boon N, Sorgeloos P, Verstraete W, Bossier P (2008) Quorum sensing and quorum quenching in Vibrio harveyi: lessons learned from in vivo work. ISME J 2:19–26. https://doi. org/10.1038/ismej.2007.92

Díaz V, Ibáñez R, Gómez P, Urtiaga AM, Ortiz I (2012) Kinetics of nitrogen compounds in a commercial marine Recirculating Aquaculture System. Aquac Eng 50:20–27. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.03.004

Dolan E, Murphy N, O'Hehir M (2013) Factors influencing optimal micro-screen drum filter selection for recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 56:42–50. https://doi.org/10.1016/ j.aquaeng.2013.04.005

Drennan DG, Hosler KC, Francis M, Weaver D, Aneshansley E, Beckman G, Johnson CH, Cristina CM (2006) Standardized evaluation and rating of biofilters. II. Manufacturer's and user's perspective. Aquac Eng 34:403–416. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.001

Duncan IJ (2005) Science-based assessment of animal welfare: farm animals. Rev Sci Tech 24:483–492

Ebeling JM, Timmons MB (2012) Recirculating aquaculture systems. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture production systems. Wiley, Oxford.

Ebeling JM, Timmons MB, Bisogni JJ (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture 257:346–358. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019

EIFAC/ICES (1980) World conference on flow-through and recirculation systems, Stavanger, Norway 1980 and the 1981 World Aquaculture conference, Venice, Italy

Ellis T, Scott AP, Bromage N, North B, Porter M (2001) What is stocking density? Trout News 32:35–37

Emparanza E.J.M. (2009) Problems affecting nitrification in commercial RAS with fixed-bed biofilters for salmonids in Chile. Aquac Eng 41:91–96. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2009.06.010

Eshchar M, Mozes N, Fediuk M (2003) Carbon dioxide removal rate by aeration devices in marine fish tanks. Isr J Aquac-Bamidgeh 55:79–85

FAO (2001) Integrated agriculture-aquaculture: a primer 407. ISBN 9251045992

FAO (2004) Aquaculture management and conservation service (FIMA) 2004–2018. Cultured aquatic species information programme. Carassius carassius. Cultured aquatic species infor- mation programme. Weimin M. Accessed 5 Jan 2018

Fast AW, Tan EC, Stevens DF, Olson JC, Qin J, Barclay DK (1999) Paddlewheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities.

Aquac Eng 19:99–103. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00044-2
FAWC (2014) Farm animal welfare committee. Welfare of farmed fish. Available on www.defra. gov.uk/fawc. Accessed 18 Jan 2018
Fernandes P, Pedersen L-F, Pedersen PB (2015) Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 65:17–26. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.007
Fox BK, Tamaru CS, Hollyer J et al (2012) A preliminary study of microbial water quality related to food safety in recirculating aquaponic fish and vegetable production systems. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa. Food Safety and Technology
Gehlert G, Griese M, Schlachter M, Schulz C (2018) Analysis and optimisation of dynamic facility ventilation in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 80:1–10. https://doi.org/10.1016/j. aquaeng.2017.11.003
Gendel Y, Lahav O (2013) A novel approach for ammonia removal from fresh-water recirculated aquaculture systems, comprising ion exchange and electrochemical regeneration. Aquac Eng 52:27–38. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.005
Gomez RC (2011) Integrated fish farming systems. Available at: http://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/Meetings/World_Water_Day_2011/5-integrated_aquaculture.pdf. Accessed.12 Feb 2018.
Gonçalves AA, Gagnon GA (2011) Ozone application in recirculating aquaculture system: an overview. Ozone Sci Eng 33:345–367. https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595
Good C, Davidson J, Welsh C, Snekvik K, Summerfelt S (2011) The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout Oncorhynchus mykiss in low-exchange water recirculation aquaculture systems. Aquac Eng 44:97–102. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.04.003
Good C, Davidson J, Earley RL, Lee E, Summerfelt S (2014) The impact of water exchange rate and treatment processes on water-borne hormones in recirculation aquaculture systems containing sexually maturing Atlantic salmon Salmo salar. J Aquac Res Development 5:260. https://doi.org/10.4172/2155-9546.1000260
Good C, Davidson J, Earley RL, Styga J, Summerfelt S (2017) The effects of ozonation on select waterborne steroid hormones in reicirculation aquaculture systems containing sexually mature Atlantic salmon Salmo salar. Aquac Eng 79:9–16. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.08.004
Good C, Davidson J, Terjesen BF, Talke H, Kolarevic J, Baeverfjord G, Summerfelt S (2018) The effects of long-term 20mg/l carbon dioxide exposure on the health and performance of Atlantic salmon Salmo salar post-smolts in water recirculation aquaculture systems. Aquac Eng 81:1–9. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.01.003

Gorle JMR, Terjesen BF, Mota VC, Summerfelt S (2018) Water velocity in commercial RAS culture tanks for Atlantic salmon smolt production. Aquac Eng 81:89–100

Gornati R, Papis E, Rimoldi S, Terova G, Saroglia M, Bernardini G (2004) Rearing density influences the expression of stress-related genes in sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.). Gene 341:111–118. https://doi.org/10.1016/j.gene.2004.06.020

Graber A, Antenen N, Junge R (2014) The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. In: Maček Jerala M, Maček MA (eds) Conference VIVUS: transmis- sion of innovations, knowledge and practical experience into everyday practice, Strahinj, Slovenia

Grady CPL, Lim HC (1980) Biological wastewater treatment: theory and applications. Marcel Dekker, New York

Grimsrud KM, Nielsen HM, Olesen I (2013) Households' willingness-to-pay for improved fish welfare in breeding programs for farmed Atlantic salmon. Aquaculture 372–375:19–27. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.10.009

Gutierrez-Wing MT, Malone RF (2006) Biological filters in aquaculture: trends and research directions for freshwater and marine applications. Aquac Eng 34:163–171. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.003

Guttman L, Rijn J (2008) Identification of conditions underlying production of geosmin and 2-methylisoborneol in a recirculating system. Aquaculture 279:85–91. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.03.047

Hammock D, Huang CC, Mort G, Swinehart JH (2003) The effect of humic acid on the uptake of mercury(II), cadmium(II), and zinc(II) by Chinook salmon (Oncorhynchus tshawytscha) eggs. Arch Environ Contam Toxicol 44:83–88. https://doi.org/10.1007/s00244-002-1261-9

Hulata G, Simon Y (2011) An overview on desert aquaculture in Israel. In: Crespi V, Lovatelli, A (eds) Aquaculture in desert and arid lands: development constraints and opportunities. FAO technical workshop. Hermosillo, Mexico. FAO fisheries and aquaculture proceedings no. 20. Rome, FAO. 6–9 July 2010, pp 85–112

Huntingford FA, Adams C, Braithwaite VA, Kadri S, Pottinger TG, Sandøe P, Turnbull JF (2006) Current issues in fish welfare. J Fish Biol 68:332–372. https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2006.001046.x

Jorgensen EH, Christiansen JS, Jobling M (1993) Effects of stocking density on food intake, growth performance and oxygen consumption in Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). Aquaculture 110:191–204. https://doi.org/10.1016/0044-8486(93)90272-Z

Kesarcodi-Watson A, Kaspar H, Lategan MJ, Gibson L (2008) Probiotics in aquaculture: the need, principles and mechanisms of action and screening processes. Aquaculture 274:1–14. https://

doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.019
Klas S, Mozes N, Lahav O (2006) Development of a single-sludge denitrification method for nitrate removal from RAS effluents: lab-scale results vs. model prediction. Aquaculture 259:342–353. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.049
Krom MD, van Rijn J (1989) Water quality processes in fish culture systems: processes, problems, and possible solutions. In: de Pauw N, Jaspers E, Ackerfors H, Wilkins N (eds) Aquaculture-a biotechnology in progress, vol 2. European aquaculture society, Bredene, pp 1091–1111
Kucuk H, Midilli A, Özdemir A, Çakmak E, Dincer I (2010) Exergetic performance analysis of a recirculating aquaculture system. Energy Convers Manag 51(5):1033–1043. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.12.007
Lahav O, Ben Asher R, Gendel Y (2015) Potential applications of indirect electrochemical ammonia oxidation within the operation of freshwater and saline-water recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 65:55–64. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.009
Lee J (2014) Separation of fine organic particles by a low-pressure hydrocyclone (LPH). Aquac Eng. 63:32–38. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.07.002
Lekang OI (2013) Aquaculture engineering, 2nd edn. Wiley, AmesLeonard N, Blancheton JP, Guiraud JP (2000) Populations of heterotrophic bacteria in an exper- imental recirculating aquaculture system. Aquac Eng 22:109–120. https://doi.org/10.1016/ S0144-8609(00)00035-2
Leonard N, Guiraud JP, Gasset E, Cailleres JP, Blancheton JP (2002) Bacteria and nutrients – nitrogen and carbon – in a recirculating system for sea bass production. Aquac Eng 26:111–127. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00008-0
Lewis WM, Wehr LW (1976) A fish-rearing system incorporating cages, water circulation, and sewage removal. Prog Fish Cult 38(2):78–81. https://doi.org/10.1577/1548-8659(1976)38[78: AFSICW]2.0.CO;2
Lewis WM, Yopp JH, Schramm HL Jr, Brandenburg AM (1978) Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. Trans Am Fish Soc 107(1):92–99. https:// doi.org/10.1577/1548-8659(1978)107<92:UOHTMQ>2.0.CO;2
Li X, Przybyla C, Triplet S, Liu Y, Blancheton JP (2015) Long-term effects of moderate elevation of oxidation-reduction potential on European seabass (Dicentrarchus labrax) in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 64:15–19. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.11.006
Liu Y, Rosten T, Henriksen K, Hognes E, Summerfelt S, Vinci B (2016) Comparative economic performance and carbon footprint of two farming models for producing Atlantic salmon (Salmo salar): land-based closed containment system in freshwater and open net pen in seawater.

Aquac Eng 71:1–12
Livingstone DR (2003) Oxidative stress in aquatic organisms in relation to pollution and aquacul- ture. Rev Med Vet-Toulouse 154:427–430
Loyless JC, Malone RE (1998) Evaluation of air-lift pump capabilities for water delivery, aeration, and degasification for application to recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 18 (2):117–133. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(98)00025-9
Malone RF, Pfeiffer TJ (2006) Rating fixed film nitrifying biofilters used in recirculating aquacul- ture systems. Aquac Eng 34:389–402. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.007
Manan H, Moh JHZ, Kasan NA et al (2017) Identification of biofloc microscopic composition as the natural bioremediation in zero water exchange of pacific white shrimp, Penaeus vannamei, cultured in close hatchery system. Appl Water Sci 7:2437–2446. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0421-4
Mancinelli RL (1996) The nature of nitrogen: an overview. Life Support Biosph Sci 3(1–2):17–24
Martins CIM, Eding EH, Schneider O, Rasmussen R, Olesen B, Plesner L, Verreth JAJ (2005) Recirculation aquaculture systems in Europe. CONSENSUS. Oostende, Belgium, Consensus working group. Eur Aquacult Soc 31
Martins CIM, Ochola D, Ende SSW, Eding EH, Verreth JAJ (2010a) Is growth retardation present in Nile tilapia Oreochromis niloticus cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems. Aquaculture 298:43–50. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.09.030
Martins CIM, Eding EH, Verdegem MCJ, Heinsbroek LTN, Schneider O, Blancheton JP, Roque d'Orbcastel E, Verreth JAJ (2010b) New developments in recirculating aquaculture systems inEurope: a perspective on environmental sustainability. Aquac Eng 43(3):83–93. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002
Martins CIM, Eding EH, Verreth JAJ (2011) Stressing fish in recirculating aquaculture systems (RAS): does stress induced in one group of fish affect the feeding motivation of other fish sharing the same RAS? Aquac Res 42:1378–1384. https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2010.02728.x
Martins CIM, Galhardo L, Noble C et al (2012) Behavioural indicators of welfare in farmed fish. Fish Physiol Biochem 38:17. https://doi.org/10.1007/s10695-011-9518-8
Masalo I (2008) Hydrodynamic characterization of aquaculture tanks and design criteria for improving self-cleaning properties. Ph.D thesis. Universitat Politechnica de Catalunya BARCELONATECH, Spain
Meinelt T, Paul A, Phan TM, Zwirnmann E, Krüger A, Wienke A, Steinberg CEW (2007) Reduction in vegetative growth of the water mold Saprolegnia parasitica (Coker) by humic substances of different qualities.

Aquat Toxicol 83:93–103. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.03.013
Meinelt T, Kroupova H, Stüber A, Rennert B, Wienke A, Steinberg CEW (2010) Can dissolved aquatic humic substances reduce the toxicity of ammonia and nitrite in recirculating aquaculture systems? Aquaculture 306:378–383. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.06.007
Merchie G, Lavens P, Verreth J, Ollevier F, Nelis H, DeLeenheer A, Storch V, Sorgeloos P (1997) The effect of supplemental ascorbic acid in enriched live food for Clarias gariepinus larvae at start feeding. Aquaculture 151:245–258. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01505-0
Michaud L, Blancheton JP, Bruni V, Piedrahita R (2006) Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. Aquac Eng 34:224–233. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.005
Michaud L, Lo Giudice A, Troussellier M, Smedile F, Bruni V, Blancheton JP (2009) Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system. J Appl Microbiol 107:1935–1946. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04378.x
Michaud L, Lo Giudice A, Interdonato F, Triplet S, Ying L, Blancheton JP (2014) C/N ratio- induced structural shift of bacterial communities inside lab-scale aquaculture biofilters. Aquac Eng 58:77–87. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.11.002
Montero D, Izquierdo MS, Tort L, Robaina L, Vergara JM (1999) High stocking density produces crowding stress altering some physiological and biochemical parameters in gilthead seabream, Sparus aurata, juveniles. Fish Physiol Biochem 20:53–60. https://doi.org/10.1023/A:1007719928905
Moran D (2010) Carbon dioxide degassing in fresh and saline water. I: degassing performance of a cascade column. Aquac Eng 43:29–36. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.05.001
Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E et al (2015) Perspective for aquaponic systems: "Omic" technologies for microbial community analysis. Biomed Res Int 2015, Article ID 480386, 10 pages. https://doi.org/10.1155/2015/480386
Murray RG, Watson SW (1965) Structure of Nitrocystis oceanus and comparison with Nitrosomonas and Nitrobacter. J Bacteriol 89(6):1594–1609
Murray F, Bostock J, Fletcher M (2014) Review of RAS technologies and their commercial application. Final report. Available at http://www.hie.co.uk
Naegel LCA (1977) Combined production of fish and plants in recirculating water. Aquaculture 10 (1):17–24. https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90029-1
Noga E (2010) Fish disease: diagnosis and treatment, 2nd edn. Wiley, Ames

Oca J, Masalo I (2012) Flow pattern in aquaculture circular tanks: influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. Aquac Eng 52:65–72

Olesen I, Alfnes F, Bensze Røra M, Kolstad K (2010) Eliciting consumers' willingness to pay for organic and welfare-labelled salmon in a non-hypothetical choice experiment. Livest Sci 127 (2–3):218–226. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.10.001

Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam JM, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. Aquac Int 26:813. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z

Papoutsoglou SE, Karakatsouli N, Batzina A, Papoutsoglou ES, Tsopelakos A (2008) Effect of Mozart's music stimulus on gilthead seabream (Sparus aurata L.) physiology under different light intensity in a recirculating water system. J Fish Biol 73:980–1004. https://doi.org/10.1111/ j.1095-8649.2008.02001.x

Park J, Kim PK, Lim T, Daniels HV (2013) Ozonation in seawater recirculating systems for black seabream Acanthopagrus schlegelii (Bleeker): effects on solids, bacteria, water clarity, and color. Aquac Eng 55:1–8. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.01.002

Park J, Kim PK, Park S, Daniels HV (2015) Effects of two different ozone doses on total residual oxidants, nitrogen compounds and nitrification rate in seawater recirculating systems for black seabream Acanthopagrus schlegelii (Bleeker). Aquac Eng 67:1–7. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.05.003

Pedersen PB, von Ahnen M, Fernandes P, Naas C, Pedersen L-F, Dalsgaard J (2017) Particle surface area and bacterial activity in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 78A:18–23. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.04.005

Peuranen S, Vuorinen PJ, Vuorinen M, Hollender A (1994) The effects of iron, humic acids and low pH on the gills and physiology of brown trout (Salmo trutta). Ann Zool Fenn 31:389–396

Pittmann T, Steinmetz H (2013) Development of a process to produce bioplastic at municipal wastewater treatment plants. Conference paper Prosser JI (1989) Autotrophic nitrification in bacteria. Adv Microb Physiol 30:125–181

Randall DJ, Tsui TKN (2002) Ammonia toxicity in fish. Marine Poll Bull 45:17–23

Reiser S, Schroeder JP, Wuertz S, Kloas W, Hanel R (2010) Histological and physiological alterations in juvenile turbot (*Psetta maxima*, L.) exposed to sublethal concentrations of ozone-produced oxidants in ozonated seawater. Aquaculture 307:157–164. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.07.007

Reiser S, Wuertz S, Schroeder JP, Kloas W, Hanel R (2011) Risks of seawater ozonation in recirculation aquaculture – effects of oxidative stress on animal welfare of juvenile turbot (*Psetta maxima*, L.). Aquat Toxicol 105:508–517. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.08.004

Richardson LB, Burton DT, Block RM, Stavola AM (1983) Lethal and sublethal exposure and recovery effects of ozone-produced oxidants on adult white perch (Morone americana Gmelin). Water Res 17:205–213. https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90101-X

Ritola O, Lyytikainen T, Pylkko P, Molsa H, Lindstrom-Seppa P (2000) Glutathione-dependant defence system and monooxygenase enzyme activities in Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.) exposed to ozone. Aquaculture 185:219–233. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00355-5

Ritola O, Livingstone DR, Peters LD, Lindstrom-Seppa P (2002) Antioxidant processes are affected in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to ozone and oxygen-supersaturated water. Aquaculture 210:1–9. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00823-7

Rojas-Tirado P, Bovbjerg Pedersen P, Pedersen L-F (2017) Bacterial activity dynamics in the water phase during start-up of recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 78A:24–31. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.09.004

Rosenthal H (1980) Recirculation systems in western Europe. World symposium on aquaculture in heated effluents and recirculation system, Stavanger, Institut für Kuesten- und Binnefischerei, Bundesforschungsanstalt Hamburg, BRD

Rosenthal H, Black EA (1993) Recirculation systems in aquaculture. In: Wang J-K (ed) Techniques for modem aquaculture. ASAE, St. Joseph, pp 284–294

Rurangwa E, Verdegem MCJ (2015) Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. Rev Aquac 7:117–130. https://doi.org/10.1111/raq.12057

Rusten B, Eikebrokk B, Ulgenes Y, Lygren E (2006) Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquac Eng 34:322–331. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002

Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits THM (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199:613. https://doi.org/10.1007/s00203-016-1334-1

Schreier HJ, Mirzoyan N, Saito K (2010) Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. Curr Opin Biotechnol 21:318–325. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.011

Schroeder JP, Croot PL, Von Dewitz B, Waller U, Hanel R (2011) Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquaculture systems. Aquac Eng

45:35–41. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.06.001
Sharrer MJ, Summerfelt ST, Bullock GL, Gleason LE, Taeuber J (2005) Inactivation of bacteria using ultraviolet irradiation in a recirculating salmonid culture system. Aquac Eng 33:135–149. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.001
Singh S, Marsh LS (1996) Modelling thermal environment of a recirculating aquaculture facility. Aquaculture 139:11–18. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01164-1
Sirsat S, Neal J (2013) Microbial profile of soil-free versus insoil grown lettuce and intervention methodologies to combat pathogen surrogates and spoilage microorganisms on lettuce. Foods 2 (4):488–498. https://doi.org/10.3390/foods2040488
Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. In: FAO fisheries and aquaculture technical paper food and agriculture organization of the United Nations, Rome, Italy, p 262
Stevenson FJ (1994) Humus Chemistry: genesis, composition, reactions, 2nd edn. Wiley, New York, p 496. https://doi.org/10.1021/ed072pA93.6
Suhr KI, Pedersen LF, Nielsen JL (2014) End-of-pipe single-sludge denitrification in pilot-scale recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 62:28–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.06.002
Summerfelt ST (2003) Ozonation and UV irradiation – An introduction and examples of current applications. Aquac Eng 28:21–36. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00069-9
Summerfelt ST (2006) Design and management of conventional fluidized-sand biofilters. Aquac Eng 34:275–302. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.08.010
Summerfelt ST, Hochheimer JN (1997) Review of Ozone processes and applications as an oxidizing agent in Aquaculture. Progress Fish-Culturist 59:94–105. https://doi.org/10.1577/1548-8640(1997)059<0094:ROOPAA>2.3.CO;2
Summerfelt S, Davidson JW, Waldrop TB, Tsukuda S, Bebak-Williams J (2004) A partial-reuse system for coldwater aquaculture. Aquac Eng 157–181. https://doi.org/10.1016/j.cell.2013.02.048
Summerfelt ST, Sharrer MJ, Tsukuda SM, Gearheart M (2009) Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation. Aquac Eng 40:17–27. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.10.002
Summerfelt ST, Zulke A, Kolarevic J, Megard Reiten BK, Selset R, Guiterrez X, Terjesen BF (2015) The effects of alkalinity on ammonia removal, carbon dioxide stripping, and pH in semi- commercial scale water recirculating aquaculture systems operated with moving bed bioreactors. Aquac Eng 65:46–54. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.11.002

Summerfelt ST, Mathisen F, Buran Holan A, Terjesen BF (2016) Survey of large circular and octagonal tanks operated at Norwegian commercial smolt and post-smolt sites. Aquac Eng 74:105–110. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.07.004

Tal Y, Watts JEM, Schreier HJ (2006) *Anaerobic ammonium*-oxidizing (Anammox) bacteria and associated activity in fixed-film biofilters of a marine recirculating aquaculture system. Appl Environ Microbiol 72:2896–2904. https://doi.org/10.1128/AEM.72.4.2896-2904.2006

Tal Y, Schreier HJ, Sowers KR, Stubblefield JD, Place AR, Zohar Y (2009) Environmentally sustainable land-based marine aquaculture. Aquaculture 286:28–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.043

Tango MS, Gagnon GA (2003) Impact of ozonation on water quality in marine recirculation systems. Aquac Eng 29:125–137. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(03)00061-X

Terhune JM, Friars GW, Bailey JK, O'Flynn FM (1990) Noise levels may influence Atlantic salmon smolting rates in tanks. J Fish Biol 37:185–197. https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1990.tb05939.x

Timmons MB, Ebeling JM (2010) Recirculating aquaculture, 2nd edn. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca

Timmons MB, Losordo TM (1994) Aquaculture water reuse systems – engineering design and management. Elsevier, Amsterdam

Tomita-Yokotani K, Anilir S, Katayama N, Hashimoto H, Yamashita M (2009) Space agriculture for habitation on mars and sustainable civilization on earth. Recent Adv Space Technol:68–69. https://doi.org/10.1109/RAST.2009.5158276

Tort L, Rotllant J, Liarte C, Acerete L, Hernandez A, Ceulemans S, Coutteau P, Padros F (2004) Effects of temperature decrease on feeding rates, immune indicators and histopathological changes of gilthead sea bream Sparus aurata fed with an experimental diet. Aquaculture 229:55–65. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00403-4

Turnbull JF, Kadri S (2007) Safeguarding the many guises of farmed fish welfare. Dis Aquat Org 75:173–182. https://doi.org/10.3354/dao075173

Vadstein O, Mo TA, Bergh Ø (2004) Microbial interactions, prophylaxis and diseases. In: Moksness E, Kjørsvik E, Olsen Y (eds) Culture of cold-water marine fishes. Blackwell Publishing, Bath, pp 28–72. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.004

Van Rijn J (1996) The potential for integrated biological treatment systems in recirculating fish culture—a review. Aquaculture 139(3–4):181–201. https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01151-X

van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 53:49–56. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010

van Rijn J, Nussinovitch A (1997) An empirical model for predicting

degradation of organic solids in fish culture systems based on short-term observations. Aquaculture 154(2):173–179. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00048-3

van Rijn J, Rivera G (1990) Aerobic and anaerobic biofiltration in an aquaculture unit: nitrite accumulation as a result of nitrification and denitrification. Aquac Eng 9:1–18

van Rijn J, Tal Y, Schreier HJ (2006) Denitrification in recirculating systems: theory and applications. Aquac Eng 34(3):364–376

Vazzana M, Cammarata M, Cooper EL, Parrinello N (2002) Confinement stress in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) depresses peritoneal leukocyte cytotoxicity. Aquaculture 210:231–243. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00818-3

Veerapen JP, Lowry BJ, Couturier MF (2005) Design methodology for the swirl separator. Aquac Eng 33:21–45. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.11.001

Verreth JAJ, Eding EH (1993) European farming industry of African catfish (*Clarias gariepinus*) facts and figures. J World Aquacult Soc 24:6–13

Volpato GL, Goncalves-de-Freitas E, Fernandes-de-Castilho M (2007) Insights into the concept of fish welfare. Dis Aquat Org 75:165–171. https://doi.org/10.3354/dao075165

Wagner EJ, Bosakowski T, Miller SA (1995) Evaluation of the absorption efficiency of the Low Head Oxygenation System. Aquac Eng 14:49–57. https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)P4426-C

Wold P-A, Holan AB, Øie G, Attramadal K, Bakke I, Vadstein O, Leiknes TO (2014) Effects of membrane filtration on bacterial number and microbial diversity in marine recirculating aqua culture system (RAS) for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) production. Aquaculture 422–423:69–77. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.019

Wong KB, Piedrahita RH (2000) Settling velocity characterization of aquacultural solids. Aquac Eng 21:233–246. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(99)00033-3

Wysocki LE, Davidson JW III, Smith ME, Frankel AS, Ellison TE, Mazik PM, Popper AN, Bebak J (2007) The effects of aquaculture production noise on hearing, growth, and disease resistance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Aquaculture 272:687–697. https://doi.org/10.1016/j.aqua culture.2007.07.225

Yamin G, Borisover M, Cohen E, van Rijn J (2017a) Accumulation of humic-like and proteinaceous dissolved organic matter in zero-discharge aquaculture systems as revealed by fluorescence EEM spectroscopy. Water Res 108:412–421. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.028

Yamin G, Falk R, Avtalion RR, Shoshana N, Ofek T, Smirnov R, Rubenstein G, van Rijn J (2017b) The protective effect of humic-rich substances on atypical Aeromonas salmonicida subsp. salmonicida infection in

common carp (Cyprinus carpio L.). J Fish Dis 40(12):1783–1790. https://doi.org/10.1111/jfd.12645

Yamin G, Zilberg D, Levy G, van Rijn J (2017c) The protective effect of humicrich substances from monogenean arasites infecting the guppy (*Poecilia reticulata*). Aquaculture 479:487–489. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.022

Yildiz HY, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review. Water 9(1):13. https://doi.org/10.3390/w9010013

Yogev U, Sowers KR, Mozes N, Gross A (2016) Nitrogen and carbon balance in a novel near-zero exchange saline recirculating aquaculture system. Aquaculture 467:118–126

Zeng Q, Tian X, Wang L (2017) Genetic adaptation of microbial populations present in high intensity catfish production systems with therapeutic oxytetracycline treatment. Sci Rep 7:17491. https://doi.org/10.1038/s41598-017-17640-3

Zhu S, Chen S (2002) The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. Aquac Eng 26(4):221–237. https://doi.org/10.1016/S0144-8609(02)00022-5

Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Guimbaud C, Fang Y (2016) Effects of pH on nitrogen trans- formations in media-based aquaponics. Bioresour Technol 210:81–87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.079

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 4

TECNOLOGÍAS HIDROPÓNICAS

Carmelo Maucieri, Carlo Nicoletto,
Erik van Os, Dieter Anseeuw,
Robin Van Havermaet, and Ranka Junge.

Capítulo 4.
TECNOLOGÍAS HIDROPÓNICAS

Carmelo Maucieri, Carlo Nicoletto, Erik van Os, Dieter Anseeuw, Robin Van Havermaet, and Ranka Junge*

Resumen
Hidroponía es un método para cultivar sin tierra, y como tal, estos sistemas se agregan a los componentes de la acuicultura para crear sistemas de acuaponía. Por lo tanto, junto con el sistema de recirculación de la acuicultura (RAS), la producción hidropónica forma una parte clave del sistema acuicoagrícola de acuaponía. Se pueden aplicar muchas tecnologías hidropónicas existentes diferentes al diseñar sistemas de acuaponía. Esto depende de las circunstancias ambientales y financieras, el tipo de cultivo que se cultiva y el espacio disponible. Este capítulo proporciona una visión general de los diferentes tipos hidropónicos, incluidos sustratos, nutrientes y soluciones de nutrientes, y los métodos de desinfección de las soluciones de nutrientes recirculantes.

Palabras clave: Hidropónicos; cultivo sin suelo; Nutrientes; medio de crecimiento Aeroponicos; Acuapónicos; solución de Nutrientes

4.1. INTRODUCCIÓN

En la producción de cultivos hortícolas, la definición de cultivo sin suelo abarca todos los sistemas que proporcionan producción de plantas en condiciones sin suelo en las que el suministro de agua y minerales se lleva a cabo en soluciones nutritivas con o sin un medio de cultivo (por ejemplo,

C. Maucieri*. C. Nicoletto
Department of Agriculture, Food, Natural Resources, Animals and Environment, University of Padova, Campus of Agripolis, Legnaro, Italy e-mail: carmelo.maucieri@unipd.it; carlo.nicoletto@unipd.it
E. v. Os
Wageningen University and Research, Business Unit Greenhouse Horticulture, Wageningen, The Netherlands e-mail: erik.vanos@wur.nl
D. Anseeuw
Inagro, Roeselare, Belgium e-mail: info@inagro.be
R. V. Havermaet
Provinciaal Proefcentrum voor de Groenteteelt Oost-Vlaanderen, Kruishoutem, Belgium. e-mail: robin@pcgroenteteelt.be
R. Junge
Institute of Natural Resource Sciences Grüental, Zurich University of Applied Sciences, Wädenswil, Switzerland. e-mail: ranka.junge@zhaw.ch

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4

lana de roca, turba, perlita, piedra pómez, fibra de coco, etc.). Los sistemas de cultivo sin suelo, comúnmente conocidos como sistemas hidropónicos, se pueden dividir en sistemas abiertos, donde la solución de nutrientes excedente no se recicla, y sistemas cerrados, donde el exceso de flujo de nutrientes de las raíces se recolecta y recicla nuevamente dentro del sistema (Fig. 4.1).

Los sistemas de cultivo sin suelo han evolucionado como una posible solución para evitar que el suelo enfermedades que siempre han sido un problema en la industria del cultivo en invernadero.

Hoy en día, los sistemas de cultivo sin suelo son comunes en la práctica hortícola en la mayoría de los países europeos, aunque no en todos los países esto ocurre a gran escala. Las ventajas de los sistemas sin suelo en comparación con los cultivos en suelo son:

1. Sin patógenos, comienza con el uso de sustratos que no sean tierra y / o un control más fácil de los patógenos transmitidos por la tierra.
2. El crecimiento y el rendimiento son independientes del tipo / calidad del suelo del área cultivada.
3. Mejor control del crecimiento a través de un suministro específico de solución nutritiva.
4. El potencial para reutilizar la solución de nutrientes que permite maximizar los recursos.
5. Mayor calidad de los productos obtenidos por el mejor control de otros parámetros ambientales (temperatura, humedad relativa) y plagas.

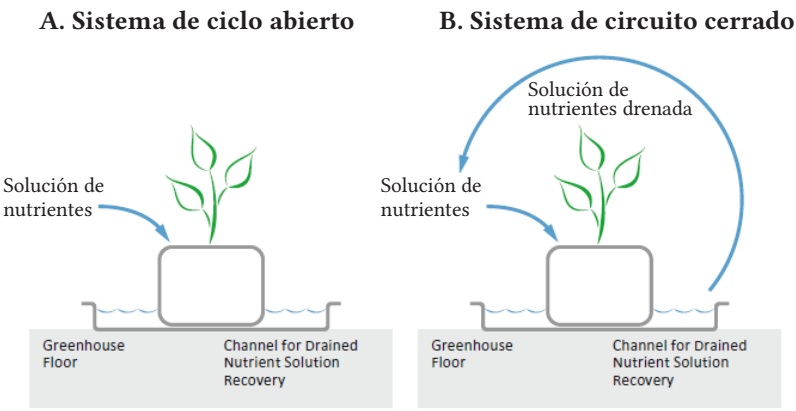


Fig. 4.1
Esquema de un Sistema de ciclo abierto (a) y un Sistema de ciclo cerrado (b)

En la mayoría de los casos, se adoptan sistemas de ciclo abierto o de desperdicio en lugar de sistemas de circuito cerrado o de recirculación, aunque en más y más países europeos estos últimos son obligatorios. En estos sistemas abiertos, la solución nutritiva gastada y/o superflua se deposita en los cuerpos de agua subterráneos y superficiales, o se usa en cultivos de campo abierto. Sin embargo, con respecto a las preocupaciones económicas y ambientales, los sistemas sin suelo deben estar lo más cerrados posible, es decir, donde se produce la recirculación de la solución nutritiva, donde se reutiliza el sustrato y donde se utilizan materiales más sostenibles.

Las ventajas de los Sistemas cerrados son:

- Una reducción en la cantidad de material de desecho.
- Menos contaminación de las aguas subterráneas y superficiales.
- Un uso más eficiente del agua y los fertilizantes.
- Mayor producción debido a mejores opciones de gestión.
- Menores costos debido al ahorro en materiales y mayor producción.

También hay una serie de desventajas, tales como:

- La alta calidad del agua requerida.
- Altas inversiones.
- El riesgo de una rápida dispersión de los patógenos del suelo por la solución de nutrientes recirculantes.
- Acumulación de potenciales metabolitos fitotóxicos y sustancias orgánicas en la solución nutritiva recirculante.

En los sistemas comerciales, los problemas de dispersión de patógenos se abordan desinfectando el agua a través de técnicas de filtración física, química y / o biológica. Sin embargo, uno de los factores principales que dificultan el uso de recirculación de cultivos de solución nutritiva para cultivos de invernadero es la acumulación de sales en el agua de riego. Típicamente, hay un aumento constante en la conductividad eléctrica (CE) debido a la acumulación de iones, que no son completamente absorbidos por los cultivos. Esto puede ser especialmente cierto en entornos de acuaponía (AP) donde el cloruro de sodio (NaCl), incorporado en la alimentación del pescado, puede acumularse en el sistema. Para corregir este problema, se ha sugerido que un paso de desalinización adicional podría mejorar el equilibrio de nutrientes en los sistemas de AP de múltiples bucles (Goddek y Keesman 2018).

4.2 SISTEMAS SIN SUELO

La intensa investigación llevada a cabo en el campo del cultivo hidropónico ha llevado al desarrollo de una gran variedad de sistemas de cultivo (Hussain et al. 2014). En términos prácticos, todo esto también se puede implementar en combinación con acuicultura; Sin embargo, para este propósito, algunos son más adecuados que otros (Maucieri et al.2018). La gran variedad de sistemas que se pueden utilizar requiere una categorización de los diferentes sistemas sin suelo (Tabla 4.1).

4.2.1 Sistemas de Substrato Solido

Al comienzo del cultivo sin suelo en la década de 1970, se probaron muchos sustratos (Wallach 2008; Blok y col. 2008; Verwer 1978). Muchos fracasaron por razones como estar demasiado húmedo, demasiado seco, no sostenible, demasiado caro y liberar sustancias tóxicas. Sobrevivieron varios sustratos sólidos: lana de roca, perlita, fibra de coco, turba, espuma de poliuretano y corteza. Los sistemas de sustrato sólido se pueden dividir de la siguiente manera:

Sustratos fibrosos Estos pueden ser orgánicos (por ejemplo, turba, paja y fibra de coco) o inorgánicos (por ejemplo, lana de roca). Se caracterizan por la presencia de fibras de diferentes tamaños, que le dan al sustrato una alta capacidad de retención de agua (60–80%) y una modesta capacidad de aire

Tabla 4.1
Clasificación de los Sistemas hidropónicos de acuerdo a diferentes aspectos

Características	Categorías	Ejemplos
Sistema sin suelo	Sin substrato	NFT (Técnica de película de nutrientes) Aeropónicos DFT (Tecnica de flujo Profundo)
	Con substrato	Substratos Orgánicos (turba, fibra de coco, corteza, fibra de madera, etc.) Substratos Inorgánicos (lana de roca, piedra pómez, arena, perlita, vermiculita, arcilla expandida) Substratos Sintéticos (polyurethano, polyestyreno)
Sistemas Abierto/cerrados	Sistemas abiertos o de desperdicio	Las plantas se alimentan continuamente con solución "fresca" sin recuperar la solución drenada de los módulos de cultivo (Fig. 4.1a)
	Sistemas cerrados o de recirculación.	La solución nutritiva drenada se recicla y se completa con la falta de nutrientes al nivel EC correcto (Fig. 4.1b)
Suministro de agua	Continuos	NFT (técnica de flujo de nutrientes) DFT (Técnica de flujo profundo)
	Periódico	Riego por goteo, flujo y reflujo, aeroponía

(porosidad libre) (Wallach 2008). Un alto porcentaje del agua retenida está fácilmente disponible para la planta, que se refleja directamente en el volumen mínimo de sustrato por planta requerido para garantizar un suministro de agua suficiente. En estos sustratos no hay gradientes evidentes de agua y salinidad a lo largo del perfil, y, en consecuencia, las raíces tienden a crecer más rápido, de manera uniforme y abundante, utilizando todo el volumen disponible.

Sustratos granulares Generalmente son inorgánicos (por ejemplo, arena, piedra pómez, perlita, arcilla expandida) y se caracterizan por diferentes tamaños de partículas y, por lo tanto, texturas; tienen alta porosidad y son de drenaje libre. La capacidad de retención de agua es bastante pobre (10–40%), y gran parte del agua retenida no está fácilmente disponible para la planta (Maher et al. 2008). Por lo tanto, el volumen requerido de sustrato por planta es mayor en comparación con los fibrosos. En sustratos granulares, se observa un marcado gradiente de humedad a lo largo del perfil y esto hace que las raíces se desarrollen principalmente en el fondo de los contenedores. Se requieren tamaños de partícula más pequeños, aumento de la capacidad de retención de agua, homogeneidad de humedad y mayor CE y un volumen menor del sustrato para la planta.

Los sustratos generalmente se envuelven en revestimientos de plástico (llamados bolsas de crecimiento o losas) o se insertan en otros tipos de contenedores de varios tamaños y de materiales sintéticos.

Antes de plantar, el sustrato debe estar saturado para:

- Proporcione un suministro adecuado de agua y nutrientes en toda la losa del sustrato.
- Lograr niveles uniformes de CE y pH.
- Expulsar la presencia de aire y hacer una humectación homogénea del material.

Es igualmente importante que una fase seca del sustrato después de la plantación estimule a las plantas para que desarrollen una exploración homogénea del sustrato por las raíces para obtener un sistema de raíces abundante y bien distribuido en los distintos niveles y exponer las raíces al aire. El uso de un sustrato por segunda vez mediante la re humectación puede ser un problema porque la saturación no es posible debido a los agujeros de drenaje en la envoltura de plástico. En un sustrato orgánico (como el coco), adoptando turnos de riego cortos y frecuentes, es posible recuperar la capacidad de retención de agua para usarlo por segunda vez, más fácilmente que los sustratos inertes (lana de roca, perlita) (Perelli et al.

2009).

4.2.2 Sustratos para sistemas de base mediana

Un sustrato es necesario para el anclaje de las raíces, un soporte para la planta y también como mecanismo nutricional del agua debido a su micro porosidad y capacidad de intercambio catiónico.

Las plantas cultivadas en sistemas sin suelo se caracterizan por una relación desequilibrada de brote / raíz, demandas de agua, aire y nutrientes que son mucho mayores que en condiciones de campo abierto. En el último caso, las tasas de crecimiento son más lentas y las cantidades de sustrato son teóricamente ilimitadas. Para satisfacer estos requisitos, es necesario recurrir a sustratos que, solos o en mezcla, garanticen condiciones químicas, físicas y nutricionales óptimas y estables. Se puede usar una variedad de materiales con diferentes características y costos como sustratos como se ilustra en la Fig. 4.2. Sin embargo, hasta ahora, no hay un sustrato único que pueda usarse universalmente en todas las situaciones de cultivo.

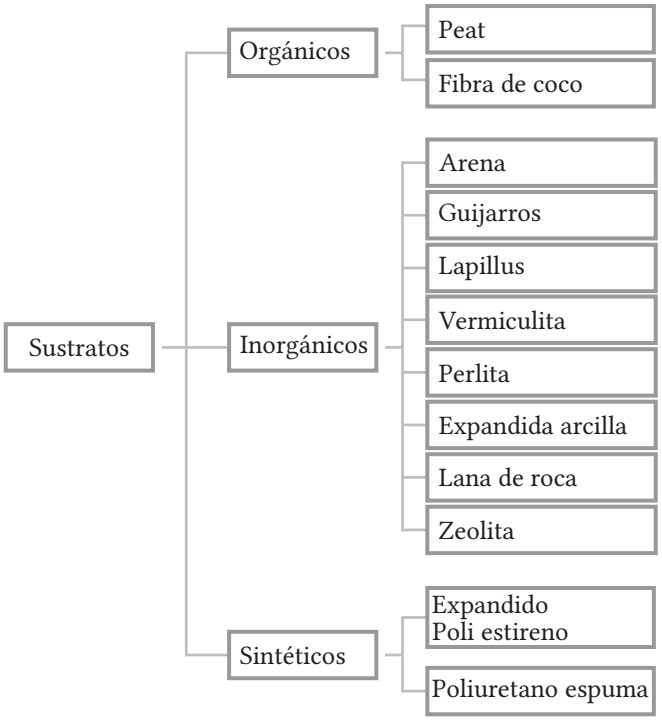


Fig. 4.2
Materiales utilizables como sustratos en sistemas sin suelo.

4.2.3 Caracterización de sustratos

Densidad aparente (BD) BD se expresa por el peso seco del sustrato por unidad de volumen. Permite el anclaje de las raíces y ofrece soporte a la planta. La BD óptimo para cultivos en un contenedor varía entre 150 y 500 kg m^{-3} (Wallach 2008). Algunos sustratos, debido a su baja BD y su holgura, como es el caso de la perlita (aprox. 100 kg m^{-3}), el poli estireno en gránulos (aprox. 35 kg m^{-3}) y la turba de musgo esfagno no comprimido (aprox. 60 kg m^{-3}), no son adecuados para usar solos, especialmente con plantas que crecen verticalmente.

Porosidad el sustrato: Ideal para cultivos en macetas debe tener una porosidad de al menos 75% con porcentajes variables de macro poros (15–35%) y micro poros (40–60%) dependiendo de las especies cultivadas y las condiciones ambientales y de cultivo (Wallach 2008; Blok et al.2008; Maher et al.2008). En contenedores pequeños, la porosidad total debería alcanzar el 85% del volumen (Bunt 2012). La estructura debe ser estable en el tiempo y debe resistir la compactación y la reducción de volumen durante las fases de deshidratación.

Capacidad de retención de agua: La capacidad de retención de agua asegura niveles adecuados de humedad sustrato para los cultivos, sin tener que recurrir a riegos frecuentes. Sin embargo, la capacidad de retención de agua no debe ser demasiado alta para evitar la asfixia de la raíz y el enfriamiento excesivo. El agua disponible para la planta se calcula por la diferencia entre la cantidad de agua a la capacidad de retención y la retenida en el punto de marchitez. Esto debería ser alrededor del 30-40% del volumen aparente (Kipp et al. 2001). Finalmente, debe considerarse que, con el aumento constante de la biomasa del sistema radicular durante el crecimiento, la porosidad libre en el sustrato se reduce gradualmente y las características hidrológicas del sustrato se modifican.

Capacidad de intercambio de cationes (CEC): CEC es una medida de cuántos cationes se pueden retener en las superficies de partículas del sustrato. En general, los materiales orgánicos tienen una CEC más alta y una mayor capacidad de amortiguación que los minerales (Wallach 2008; Blok et al. 2008) (Tabla 4.2)

pH: Se requiere un pH adecuado para satisfacer las necesidades de las especies cultivadas. Los sustratos con un pH bajo son más adecuados para cultivos en contenedores, ya que se modifican más fácilmente hacia los niveles deseados mediante la adición de carbonato de calcio y

Tabla 4.2
Principales características químico-físicas de las turbas y la fibra de coco. (dm = de materia seca)

Caracteristicas	Pantanos elevados		Pantano	
	Rubio	Café	Negro	Fibra de Coco
Materia Organica (% dm)	94–99	94–99	55–75	94–98
Ceniza (% dm)	1–6	1–6	23–30	3–6
Porosidad Total (% vol)	84–97	88–93	55–83	94–96
Capacidad de retención de Agua (% vol)	52–82	74–88	65–75	80–85
Porosidad Libre (% vol)	15–42	6–14	6–8	10–12
Densidad a Granel (kg m^{-3})	60–120	140–200	320–400	65–110
CEC (meq %)	100–150	120–170	80–150	60–130
Nitrogeno Total (% dm)	0.5–2.5	0.5–2.5	1.5–3.5	0.5–0.6
C/N	30–80	20–75	10–35	70–80
Calcio (% dm)	<0.4	<0.4	>2	–
pH (H_2O)	3.0–4.0	3.0–5.0	5.5–7.3	5.0–6.8

Fuente: Enzo et al. (2001)

también porque satisfacen las necesidades de un mayor número de especies. Además, durante el cultivo, el valor del pH tiende a aumentar debido al riego con agua rica en carbonatos. El pH también puede variar en relación con el tipo de fertilizante utilizado. Es más difícil corregir un sustrato alcalino. Sin embargo, esto se puede lograr agregando azufre o fertilizantes fisiológicamente ácidos (sulfato de amonio, sulfato de potasio) o fertilizantes ácidos (fosfato mineral) constitucionalmente.

Los sustratos de conductividad eléctrica (CE): Deben tener un contenido de nutrientes conocido y valores bajos de CE (consulte también la Tabla 4.4). A menudo es preferible usar un sustrato químicamente inerte y agregar los nutrientes en relación con los requisitos específicos del cultivo. Se debe prestar especial atención a los niveles de la CE. Los altos niveles de CE indican la presencia de iones (por ejemplo, Na +) que, aunque no son importantes como nutrientes, pueden desempeñar un papel decisivo en la idoneidad del sustrato.

Salud y seguridad: La salud en los sistemas y la seguridad para los operarios se proporciona por la ausencia de patógenos (nematodos, hongos, insectos), sustancias potencialmente fitotóxicas (pesticidas) y semillas de malezas. Algunos materiales producidos industrialmente (arcilla expandida, perlita, lana de roca, vermiculita y poliestireno) garantizan altos niveles de esterilidad debido a las altas temperaturas aplicadas durante su procesamiento.

Sostenibilidad: Otra característica importante de un sustrato es su perfil de

sostenibilidad. Muchos sustratos de uso común enfrentan desafíos ecológicos relacionados con su procedencia, proceso de producción y / o procesamiento posterior y huella de final de vida. En este sentido, los sustratos que se originan a partir de materiales con una huella ecológica baja (modificados de forma respetuosa con el medio ambiente y, en última instancia, biodegradables) son una característica adicional a tener en cuenta. La reutilización del sustrato también puede ser un aspecto importante de la sostenibilidad de un sustrato.

Costo: Por último, pero no menos importante, el sustrato debe ser económico o al menos rentable, fácilmente disponible y estandarizado desde el punto de vista químico - físico.

4.2.4 Tipo de sustratos

La elección de sustratos varía desde productos de origen orgánico o mineral que están presentes en la naturaleza y que están sujetos a un procesamiento especial (por ejemplo, turba, perlita, vermiculita), hasta aquellos de origen orgánico derivados de actividades humanas (por ejemplo, desechos o subproductos de actividades agrícolas, industriales y urbanas) y de origen industrial obtenidas por procesos de síntesis (por ejemplo, poliestireno).

4.2.4. Materiales orgánicos

Esta categoría incluye sustratos orgánicos naturales, incluidos residuos, desechos y subproductos de naturaleza orgánica derivados de la agricultura (estiércol, paja, etc.) o, por ejemplo, industrial, subproductos de la industria maderera, etc. o de asentamientos urbanos. p. ej. lodos de depuradora, etc. Estos materiales pueden someterse a un procesamiento adicional, como extracción y maduración.

Todos los materiales que pueden usarse en hidroponía también pueden usarse en AP. Sin embargo, como la carga bacteriana en una solución AP puede ser mayor que en soluciones hidropónicas convencionales, por lo tanto, se puede esperar que los sustratos orgánicos puedan ser propensos a una mayor tasa de descomposición, causando problemas de compactación del sustrato y aireación de la raíz. Por lo tanto, los materiales orgánicos pueden considerarse para cultivos con un ciclo de crecimiento más corto, mientras que los sustratos minerales pueden preferirse para cultivos con un ciclo de crecimiento largo.

Turba

La turba, utilizada sola o con otros sustratos, es actualmente el material de origen orgánico más importante para la preparación del sustrato. El término turba se refiere a un producto derivado de residuos de briófitos (*Sphagnum*), Cyperaceae (*Trichophorum, Eriophorum, Carex*) y otros (*Calluna, Phragmites*, etc.) transformados en condiciones anaerobias.

Los pantanos elevados se forman en ambientes fríos y muy lluviosos. El agua de lluvia, sin sales, es retenida en la superficie por musgos y residuos vegetales, creando un ambiente saturado. En los pantanos elevados podemos distinguir una capa más profunda, muy descompuesta, de color oscuro (*turba marrón*) y una capa poco profunda, poco descompuesta, de color claro (*turba rubia*). Ambas turbas se caracterizan por una buena estabilidad estructural, una disponibilidad muy baja de nutrientes y un pH ácido, mientras que difieren principalmente en su estructura (Tabla 4.2).

Las turbas marrones, con poros muy pequeños, tienen una mayor capacidad de retención de agua y menos porosidad libre para el aire y tienen una mayor capacidad CEC y de amortiguación. Las características físicas varían en relación con el tamaño de partícula que permite la absorción de agua de 4 a 15 veces su propio peso. Los pantanos elevados generalmente satisfacen los requisitos necesarios para un buen sustrato. Además, tienen propiedades constantes y homogéneas, por lo que pueden ser explotadas industrialmente. Sin embargo, el uso de estas turbas requiere correcciones de pH con, p. carbonato de calcio ($CaCO_3$). En general, para una turba de *sphagnum* con un pH de 3–4, se deben agregar 2 kg m^{-3} de $CaCO_3$ para aumentar El pH para una unidad. Se debe prestar atención para evitar el secado completo del sustrato También debe tenerse en cuenta que la turba se somete a procesos de descomposición microbiológica que, con el tiempo, pueden aumentar la capacidad de retención de agua y reducir la porosidad libre.

Los pantanos de pantano están presentes principalmente en áreas templadas (por ejemplo, Italia y el oeste de Francia), donde Cyperaceae, Carex y Phragmites son dominantes. Estas turbas se forman en presencia de agua estancada. El contenido de oxígeno, sales y calcio en el agua permite una descomposición y humificación más rápidas, en comparación con lo que ocurre en los pantanos elevados. Esto da como resultado una turba muy oscura, de color marrón a negro con un mayor contenido de nutrientes, en particular nitrógeno y calcio, un pH más alto, una mayor densidad aparente y una porosidad libre mucho menor (Tabla 4.2). Son bastante frágiles en estado seco y tienen una notable plasticidad en estado húmedo, lo que confiere una alta susceptibilidad a la compresión y la deformación. La

relación Carbono / Nitrógeno (C / N) generalmente está entre 15 y 48 (Kuhry y Vitt 1996; Abad et al. 2002). Debido a sus propiedades, la turba negra tiene poco valor y no es adecuada como sustrato, pero puede mezclarse con otros materiales.

Cabe señalar que en algunos países existe un impulso para reducir el uso y la extracción de turba para reducir los efectos ambientales y se han identificado varios sustitutos de turba con un éxito variado.

Fibra de Coco
La fibra de coco, se obtiene de la eliminación de las cáscaras fibrosas de los cocos y es un subproducto de la industria de la copra (producción de aceite de coco) y la extracción de fibra, y está compuesto casi exclusivamente por lignina. Antes de su uso, se composta durante 2 a 3 años, y luego se deshidrata y comprime. Antes de su uso, debe rehidratarse agregando de 2 a 4 veces su volumen comprimido con agua. La fibra de coco posee características químicas y físicas que son similares a la turba rubia (Tabla 4.2), pero con las ventajas de tener un pH más alto. También tiene un impacto ambiental menor que la turba (explotación excesiva de turberas) y la lana de roca, donde existen problemas de eliminación. Esta es una de las razones por las cuales se prefiere cada vez más en sistemas sin suelo (Olle et al. 2012; Fornes et al. 2003).

Sustratos a base de madera
Los sustratos orgánicos que se derivan de la madera o sus subproductos, como la corteza, las astillas de madera o el aserrín, también se utilizan en la producción mundial de plantas comerciales (Maher et al. 2008). Los sustratos basados en estos materiales generalmente poseen un buen contenido de aire y conductividades hidráulicas altamente saturadas. Las desventajas pueden incluir bajas capacidades de retención de agua, aireación insuficiente causada por actividad microbiana, distribución inadecuada del tamaño de partícula, inmovilización de nutrientes o efectos negativos debido a la acumulación de sales y compuestos tóxicos (Dorais et al. 2006).

4.2.4.2 Materiales inorgánicos

Esta categoría incluye materiales naturales (por ejemplo, arena, piedra pómez) y productos minerales derivados de procesos industriales (por ejemplo, vermiculita, perlita) (Tabla 4.3).

Arena
Las arenas son materiales inorgánicos naturales con partículas entre 0.05 y

2.0 mm de diámetro, que se originan a partir de la meteorización de diferentes minerales. La composición química de las arenas puede variar según el origen, pero en general está constituida por 98,0–99,5% de sílice (SiO_2) (Perelli et al. 2009). El pH está relacionado principalmente con el contenido de carbonato. Las arenas con un contenido de carbonato de calcio más bajo y pH 6.4–7.0 son más adecuadas como material de sustrato porque no influyen en la solubilidad del fósforo y algunos micro elementos (por ejemplo, hierro, manganeso). Al igual que todos los sustratos de origen mineral, las arenas tienen un bajo CEC y una baja capacidad de amortiguación (Tabla 4.3). Las arenas finas (0,05–0,5 mm) son las más adecuadas para usar en sistemas hidropónicos en mezclas10-30% en volumen con materiales orgánicos. Se pueden usar arenas gruesas (> 0,5 mm) para aumentar la capacidad de drenaje del sustrato.

Piedra pómez

La piedra pómez comprende silicato de aluminio de origen volcánico, que es muy ligero y poroso, y puede contener pequeñas cantidades de sodio y potasio y trazas de calcio, magnesio y hierro, dependiendo del lugar de origen. Es capaz de retener calcio, magnesio, potasio y fósforo de las soluciones nutritivas y liberarlos gradualmente a la planta. Por lo general, tiene un pH neutro, pero algunos materiales pueden tener pH excesivamente alto, buena porosidad libre pero baja capacidad de retención de agua (Tabla 4.3). Sin embargo, la estructura tiende a deteriorarse con bastante rapidez, debido a la fácil ruptura de las partículas. La piedra pómez, agregada a la turba, aumenta el drenaje y la aireación del sustrato. Para uso en horticultura, se prefieren partículas de piedra pómez de 2 a 10 mm de diámetro (Kipp et al. 2001).

Tabla 4.3
Principales características químico-físicas de sustratos inorgánicos utilizados en sistemas sin suelo.

Substrato	Densidad a granel (kg m^{-3})	Porosidad Total (%vol)	Porosidad Libre (%vol)	Retención de agua (%vol)	CEC (meq%)	EC (mS cm^{-1})	pH
Arena	1400–1600	40–50	1–20	20–40	20–25	0.10	6.4–7.9
Piedra pomes	450–670	55–80	30–50	24–32	–	0.08–0.12	6.7–9.3
Tobas volcanicasas	570–630	80–90	75–85	2–5	3–5	–	7.0–8.0
Vermiculita	80–120	70–80	25–50	30–55	80–150	0.05	6.0–7.2
Perlita	90–130	50–75	30–60	15–35	1.5–3.5	0.02–0.04	6.5–7.5
Arcilla expandida	300–700	40–50	30–40	5–10	3–12	0.02	4.5–9.0
Lana de Roca	85–90	95–97	10–15	75–80	–	0.01	7.0–7.5
Poliestireno expandido	6–25	55	52	3	–	0.01	6.1

Source: Enzo et al. (2001)

Tobas volcánicas

Las tobas se derivan de erupciones volcánicas, con partículas que oscilan entre 2 y 10 mm de diámetro. Pueden tener una densidad aparente que oscila entre 850 y 1100 kg m^{-3} y una capacidad de retención de agua entre 15% y 25% en volumen (Kipp et al. 2001).

Vermiculita

La vermiculita comprende filosilicatos hidratados de magnesio, aluminio y hierro, que en su estado natural tienen una estructura laminar delgada que retiene pequeñas gotas de agua. La vermiculita exfoliada se usa comúnmente en la industria hortícola y se caracteriza por una alta capacidad de amortiguación y valores de CEC similares a los de las mejores turbas (Tabla 4.3), pero, en comparación con estos, tiene una mayor disponibilidad de nutrientes (5–8% de Potasio y 9-12% de Magnesio) (Perelli et al. 2009). NH4 + es especialmente fuertemente retenido por la vermiculita; Sin embargo, la actividad de las bacterias nitrificantes permite la recuperación de parte del nitrógeno fijado. Del mismo modo, la vermiculita se une 75% de fosfato en forma irreversible, mientras que tiene baja capacidad absorbente para Cl^-, NO_3^- y $SO_4.^-$ Estas características deben evaluarse cuidadosamente cuando se usa vermiculita como sustrato. La estructura de vermiculita no es muy estable debido a una baja resistencia a la compresión y tiende a deteriorarse con el tiempo, reduciendo el drenaje del agua. Se puede usar solo; sin embargo, es preferible mezclarlo con perlita o turba.

Perlita

La perlita comprende silicato de aluminio de origen volcánico que contiene 75% de SiO_2 y 13% de Al_2O_3. La materia prima se tritura, tamiza, comprime y calienta hasta 700–1000 °C. A estas temperaturas, la poca agua contenida en la materia prima se convierte en vapor al expandir las partículas en pequeños agregados de color gris blanquecino que, a diferencia de la vermiculita, tienen una estructura celular cerrada. Es muy ligero y posee una alta porosidad libre incluso después del remojo. No contiene nutrientes, tiene CEC insignificante y es prácticamente neutral (Tabla 4.3) (Verdonk et al. 1983). Sin embargo, el pH puede variar fácilmente, porque la capacidad del tampón es insignificante. El pH debe controlarse mediante la calidad del agua de riego y no debe caer por debajo de 5.0 para evitar los efectos fitotóxicos del aluminio. La estructura celular cerrada permite que el agua se retenga solo en la superficie y en los espacios entre las aglomeraciones, por lo que la capacidad de retención de agua es variable en relación con las dimensiones de las aglomeraciones. Se comercializa en diferentes tamaños, pero los más adecuados para la horticultura son de 2–5 mm de diámetro. Se puede utilizar como sustrato en lechos de enraizamiento, ya que garantiza una buena aireación. En mezclas con materiales orgánicos,

mejora la suavidad, la permeabilidad y la aireación del sustrato. La perlita se puede reutilizar durante varios años siempre que sea esterilizado entre usos.

Arcilla expandida
La arcilla expandida se obtiene tratando el polvo de arcilla a aproximadamente 700 ℃. Se forman agregados estables y, dependiendo del material de arcilla usado, tienen valores variables con respecto a CEC, pH y densidad aparente (Tabla 4.3). La arcilla expandida se puede usar en mezclas con materiales orgánicos en cantidades de aproximadamente 10 a 35% en volumen, a lo que proporciona más aireación y drenaje (Lamanna et al. 1990). Las arcillas expandidas con valores de pH superiores a 7.0 no son adecuadas para su uso en sistemas sin suelo.

Lana de roca
La lana de roca es el sustrato más utilizado en el cultivo sin suelo. Se origina de la fusión de silicatos de aluminio, calcio y magnesio y coque de carbono en 1500–2000 C. La mezcla licuada se extruye en hebras de 0.05 mm de diámetro y, después de la compresión y la adición de resinas especiales, el material asume una estructura fibrosa muy ligera con una alta porosidad (Tabla 4.3).

La lana de roca es químicamente inerte y, cuando se agrega a un sustrato, mejora su aireación y drenaje y también ofrece un excelente anclaje para las raíces de las plantas. Se usa solo, como sustrato de siembra y para cultivo sin suelo. Las losas utilizadas para el cultivo pueden emplearse durante varios ciclos de producción dependiendo de la calidad, siempre que la estructura pueda garantizar suficiente porosidad y disponibilidad de oxígeno para los sistemas de raíces. Por lo general, después de varios ciclos de cultivo, la mayor parte de la porosidad del sustrato se llena con raíces viejas y muertas, y esto se debe a la compactación del sustrato a lo largo del tiempo. El resultado es una profundidad reducida del sustrato donde las estrategias de riego pueden necesitar adaptación.

Zeolitas
Las zeolitas comprenden silicatos de aluminio hidratados caracterizados por la capacidad de absorber elementos gaseosos; Son ricos en macro y micro elementos, tienen un alto poder absorbente y tienen una superficie interna alta (estructuras con poros de 0,5 mm). Este sustrato es de gran interés ya que absorbe y libera lentamente iones K^+ y NH_4^+, mientras que no es capaz de absorber Cl^- y Na^+, que son peligrosos para las plantas. Las zeolitas se comercializan en formulaciones que difieren en el contenido de N y P y que se pueden usar en la siembra de semillas, para el enraizamiento

de esquejes o durante la fase de cultivo (Pickering et al. 2002).

4.2.4.3 Materiales Sintéticos

Los materiales sintéticos incluyen tanto materiales plásticos de baja densidad como resinas sintéticas de intercambio iónico. Estos materiales, llamados "expandidos", debido a que se obtienen mediante un proceso de dilatación a altas temperaturas, todavía no se usan ampliamente, pero poseen propiedades físicas adecuadas para equilibrar las características de otros sustratos.

Poliestireno expandido
El poliestireno expandido se produce en gránulos de 4 a 10 mm de diámetro con una estructura celular cerrada. No se descompone, es muy ligero y tiene una porosidad muy alta, pero con una capacidad de retención de agua extremadamente baja (Tabla 4.3). No tiene CEC y prácticamente no tiene capacidad de amortiguación, por lo que se agrega al sustrato (por ejemplo, turba) exclusivamente para mejorar su porosidad y drenaje. El tamaño de partícula preferido es de 4–5 mm (Bunt 2012).

Espuma de poliuretano
La espuma de poliuretano es un material de baja densidad (12-18 kg m^{-3}) con una estructura porosa que permite la absorción de agua equivalente al 70% de su volumen. Es químicamente inerte, tiene un pH casi neutro (6,5–7,0), no contiene nutrientes útiles disponibles para las plantas y no sufre descomposición (Kipp et al. 2001). En el mercado es posible encontrarlo en forma de gránulos, cubos o bloques de enraizamiento. Al igual que una lana de roca, también se puede utilizar para el cultivo sin suelo.

4.2.5 Preparación de sustratos de cultivo mixto

Los sustratos mixtos pueden ser útiles para reducir los costos generales del sustrato y / o mejorar algunas características de los materiales originales. Por ejemplo, se puede agregar turba, vermiculita y fibra de coco para aumentar la capacidad de retención de agua; perlita, poliestireno, arena gruesa y arcilla expandida para aumentar la porosidad y el drenaje libres; turba rubia para elevar la acidez; mayores cantidades de material orgánico o cantidades adecuadas de tierra arcillosa para aumentar la CEC y la capacidad de amortiguación; y sustratos de baja descomposición para aumentar durabilidad y estabilidad las características de las mezclas rara vez representan el promedio de los componentes porque con la mezcla las estructuras se modifican entre las partículas individuales y, en consecuencia, la relación de las características físicas y químicas. En general, las

mezclas con un bajo contenido de nutrientes son preferibles para poder manejar mejor el cultivo. La relación correcta entre los diferentes componentes de una mezcla también varía con las condiciones ambientales en las que opera. A altas temperaturas, es racional usar componentes que posean una mayor capacidad de retención de agua y no permitan una evaporación rápida (por ejemplo, turba) y, al mismo tiempo, sean resistentes a la descomposición. En contraste, en ambientes húmedos, con baja radiación solar, se prefieren los componentes caracterizados por una alta porosidad para asegurar un buen drenaje. En este caso, será necesario agregar sustratos gruesos como arena, piedra pómez, arcilla expandida y poli estireno expandido (Bunt 2012).

4.3. TIPOS DE SISTEMAS HIDROPÓNICOS SEGÚN LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA / NUTRIENTES

4.3.1 Técnica de flujo profundo (DFT)

La técnica de flujo profundo (DFT), también conocida como técnica de aguas profundas, es el cultivo de plantas en soporte flotante o colgante (balsas, paneles, tableros) en contenedores llenos de solución nutritiva de 10–20 cm (Van Os et al. 2008) (Fig. 4.3). En AP esto puede ser de hasta 30 cm. Existen diferentes formas de aplicación que pueden distinguirse principalmente por la profundidad y el volumen de la solución, y los métodos de recirculación y oxigenación.

Uno de los sistemas más simples comprende tanques de 20-30 cm de profundidad, que pueden ser construido de diferentes materiales e impermeabilizado con películas de polietileno. Los tanques están equipados con balsas flotantes (hay varios tipos disponibles de proveedores) que sirven para sostener las plantas sobre el agua mientras las raíces de las plantas penetran en el agua. El sistema es particularmente interesante ya que minimiza los costos y la gestión. Por ejemplo, existe una necesidad limitada

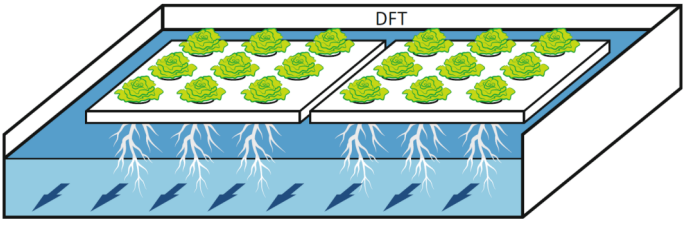


Fig. 4.3
Ilustración de un sistema DFT con paneles flotantes

de automatización del control y corrección de la solución nutritiva, particularmente en cultivos de corta duración como la lechuga, donde el volumen relativamente alto de solución facilita la reposición de la solución nutritiva solo al final de cada ciclo, y solo el contenido de oxígeno necesita ser monitoreado periódicamente. Los niveles de oxígeno deben estar por encima de 4–5 mg L^{-1}; de lo contrario, pueden aparecer deficiencias de nutrientes debido a que los sistemas de raíces absorben un bajo rendimiento. La circulación de la solución normalmente agregará oxígeno, o se pueden agregar sistemas Venturi que aumentan dramáticamente el aire en el sistema. Esto es especialmente importante cuando las temperaturas del agua son superiores a 23 ℃, ya que tales altas temperaturas pueden estimular el atornillado de la lechuga.

4.3.2 Técnica de película nutritiva (NFT)

La técnica NFT se usa de manera ubicua y puede considerarse el clásico sistema de cultivo hidropónico, donde una solución nutritiva fluye a lo largo y circula en canales con una capa de agua de 1 a 2 cm (Cooper 1979; Jensen y Collins 1985; Van Os et al. 2008) (Fig. 4.4). La recirculación de la solución nutritiva y la ausencia de sustrato representan una de las principales ventajas del sistema NFT. Una ventaja adicional es su gran potencial de automatización para ahorrar costos de mano de obra (siembra y cosecha) y la oportunidad de gestionar la densidad óptima de la planta durante el ciclo de cultivo. Por otro lado, la falta de sustrato y los bajos niveles de agua hacen que la NFT sea vulnerable a la falla de las bombas, debido a, pej. obstrucción o falla en la fuente de alimentación. Las fluctuaciones de temperatura en la solución de nutrientes pueden causar estrés en la planta seguido de enfermedades.

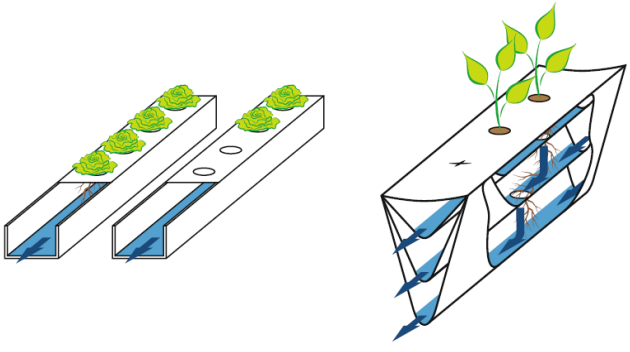


Fig. 4.4
Ilustración del sistema NFT (izquierda) y un canal NFT multicapa, desarrollado y comercializado por nuevos sistemas de cultivo (NGS), España (derecha)

El desarrollo del sistema radicular, parte del cual permanece suspendido en el aire por encima del flujo de nutrientes y que está expuesto a un envejecimiento temprano y pérdida de funcionalidad, representa una limitación importante ya que impide la producción de cultivos de ciclo largo (más de 4–5 meses). Debido a su alta susceptibilidad a las variaciones de temperatura, este sistema no es adecuado para entornos de cultivo caracterizados por altos niveles de irradiación y temperatura (por ejemplo, áreas del sur de la cuenca mediterránea). Sin embargo, en respuesta a estos desafíos, se ha diseñado un canal NFT multicapa que permite ciclos de producción más largos sin problemas de obstrucción (NGS). Está hecho de una serie de capas interconectadas colocadas en una cascada, de modo que incluso en especies de plantas de enraizamiento fuertes, como los tomates, la solución nutritiva seguirá llegando a las raíces al pasar la capa obstruida por la raíz a través de una capa inferior. posicionado.

4.3.3 Sistemas Aeropónicos

La técnica aeropónica está dirigida principalmente a especies hortícolas más pequeñas y aún no se ha utilizado ampliamente debido a los altos costos de inversión y manejo. Las plantas se sostienen con paneles de plástico o con poliestireno, dispuestos horizontalmente o en la parte superior inclinada de las cajas de cultivo. Estos paneles están soportados por una estructura hecha con materiales inertes (plástico, acero recubierto con película de plástico, paneles de poliestireno), para formar cajas cerradas donde puede desarrollarse el sistema de raíces suspendidas (Fig. 4.5).

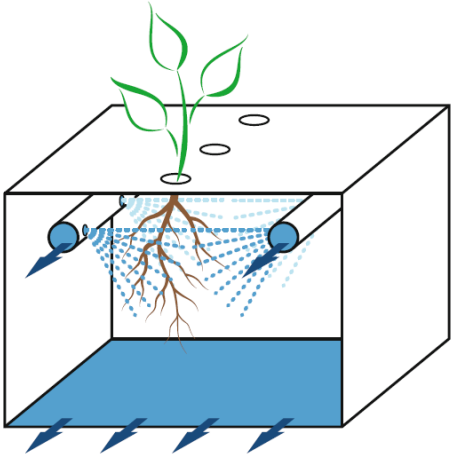


Fig. 4.5
Ilustración de la técnica aeropónica

La solución nutritiva se rocía directamente sobre las raíces, que están suspendidas en la caja en el aire, con rociadores estáticos (rociadores), insertados en tuberías alojadas dentro de la caja módulo. La duración del rociado es de 30 a 60 s, mientras que la frecuencia varía según el período de cultivo, la etapa de crecimiento de las plantas, las especies y la hora del día. Algunos sistemas usan placas vibratorias para crear micro gotas de agua que forman un vapor que se condensa en las raíces. El lixiviado se recoge en la parte inferior de los módulos de caja y se transporta al tanque de almacenamiento, para su reutilización.

4.4 FISIOLOGÍA DE LAS PLANTAS

4.4.1 Mecanismos de Absorción

Entre los principales mecanismos involucrados en la nutrición de las plantas, el más importante es la absorción que, para la mayoría de los nutrientes, tiene lugar en forma iónica después de la hidrólisis de sales disueltas en la solución nutritiva.

Las raíces activas son el órgano principal de la planta involucrado en la absorción de nutrientes. Los aniones y los cationes se absorben de la solución nutritiva y, una vez dentro de la planta, hacen que salgan los protones (H^+) o los hidroxilos (OH^-), lo que mantiene el equilibrio entre las cargas eléctricas (Haynes 1990). Este proceso, mientras se mantiene el equilibrio iónico, puede causar cambios en el pH de la solución en relación con la cantidad y calidad de los nutrientes absorbidos (Fig. 4.6).

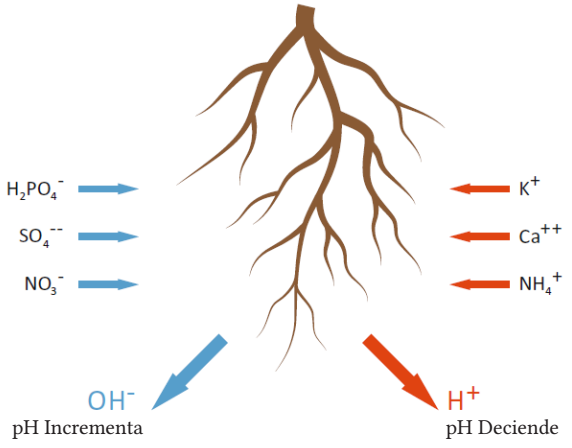


Fig. 4.6
Absorción de iones por el sistema radicular de la planta.

Las implicaciones prácticas de este proceso para el horticultor son dobles: proporcionar una capacidad tampón adecuada a la solución nutritiva (agregando bicarbonatos si es necesario) e inducir ligeros cambios de pH con la elección del fertilizante. El efecto de los fertilizantes sobre el pH se relaciona con las diferentes formas químicas de los compuestos utilizados.

En el caso del N, por ejemplo, la forma más utilizada es el nitrógeno nítrico (NO^{-3}), pero cuando se debe reducir el pH, se puede suministrar nitrógeno como nitrógeno de amonio (NH_4^+). Esta forma, cuando se absorbe, induce la liberación de H^+ y, en consecuencia, una acidificación del medio.

Las condiciones climáticas, especialmente la temperatura del aire y del sustrato y la humedad relativa, ejercen una gran influencia en la absorción de nutrientes (Pregitzer y King 2005; Masclaux-Daubresse et al. 2010; Marschner 2012; Cortella et al. 2014). En general, el mejor crecimiento ocurre cuando hay pocas diferencias entre el sustrato y la temperatura del aire. Sin embargo, los niveles persistentemente altos de temperatura en el sistema de raíces tienen un efecto negativo. Las temperaturas subóptimas reducen la absorción de N (Dong et al. 2001). Mientras que NH_4^+ se usa efectivamente a temperaturas óptimas, a baja temperatura-en la actualidad, la oxidación bacteriana se reduce, causando acumulación dentro de la planta que puede producir síntomas de toxicidad y daños en el sistema radicular y la biomasa aérea. Las bajas temperaturas a nivel de la raíz también inhiben la asimilación de K y P, así como la translocación de P. Aunque la información disponible sobre el efecto de las bajas temperaturas en la absorción de micronutrientes es menos clara, parece que la absorción de Mn, Zn, Cu y Mo son las más afectadas (Tindall et al. 1990; Fageria et al. 2002).

4.4.2 Nutrientes esenciales, su papel y posibles Antagonismos

El manejo apropiado de la nutrición de las plantas debe basarse en aspectos básicos que están influenciados por la absorción y el uso de macro y micronutrientes (Sonneveld y Voogt 2009). Los macronutrientes son necesarios en cantidades relativamente grandes, mientras que los micronutrientes u oligoelementos son necesarios en pequeñas cantidades. Además, la disponibilidad de nutrientes para la planta en el caso de los sistemas sin suelo presenta fenómenos más o menos consistentes de sinergia y antagonismo (Fig. 4.7).

Nitrógeno (N): El nitrógeno es absorbido por las plantas para producir aminoácidos, proteínas, enzimas y clorofila. Las formas de nitrógeno más utilizadas para la fertilización de las plantas son nitrato y amonio. Los

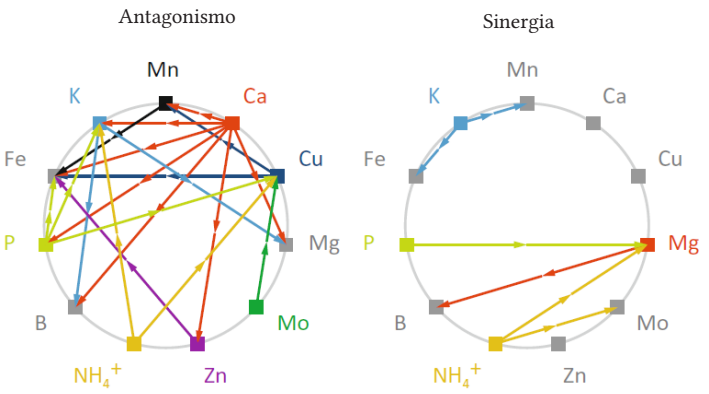


Fig. 4.7
Sinergias y antagonismos de nutrientes entre iones. Los iones conectados presentan una relación sinérgica o antagónica según la dirección de la flecha.

nitratos son rápidamente absorbidos por las raíces, son altamente móviles dentro de las plantas y pueden almacenarse sin efectos tóxicos. Las plantas solo pueden absorber el amonio en pequeñas cantidades y no pueden almacenarse en grandes cantidades porque ejerce efectos tóxicos. Cantidades superiores a 10 mg Lt inhiben la absorción de calcio y cobre de las plantas, aumentan el crecimiento de los brotes en comparación con el crecimiento de las raíces y dan Como resultado un fuerte color verde de las hojas. Los excesos adicionales en la concentración de amonío provocan efectos fitotóxicos como la clorosis a lo largo de los márgenes de las hojas. El exceso en el suministro de nitrógeno causa un alto crecimiento vegetativo, un aumento en la duración del ciclo del cultivo, un fuerte color verde de las hojas, bajo cuajado de frutos, alto contenido de agua en los tejidos, baja lignificación de los tejidos y alta acumulación de nitrato en los tejidos. Comúnmente, la deficiencia de nitrógeno se caracteriza por un color verde pálido de las hojas más viejas (clorosis), crecimiento reducido y avance de la senescencia.

Potasio (K): El potasio es fundamental para la división y extensión celular, síntesis de proteínas, activación enzimática y fotosíntesis y también actúa como transportador de otros elementos y carbohidratos a través de la membrana celular. Tiene un papel importante en mantener el potencial osmótico de la célula en equilibrio y regular la apertura de la estoma. Los primeros signos de deficiencia se manifiestan en forma de manchas amarillentas que se necrosan muy rápidamente en los márgenes de las hojas más viejas. Las plantas deficientes en potasio son más susceptibles a caídas bruscas de temperatura, estrés hídrico y ataques de hongos (Wang et al. 2013).

Fósforo (P): El fósforo estimula el desarrollo de las raíces, el rápido crecimiento de los brotes y la cantidad de flores. El P se absorbe muy fácilmente y puede acumularse sin dañar la planta. Su papel fundamental está vinculado a la formación de compuestos de alta energía (ATP) necesarios para el metabolismo de las plantas. Las cantidades promedio solicitadas por las plantas son bastante modestas (10-15% de las necesidades de N y K) (Le Bot et al. 1998). Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en el suelo, el P es fácilmente lixiviable en cultivos sin suelo. La absorción de P parece estar reducida por las bajas temperaturas del sustrato (<13 °C) o al aumentar los valores de pH (> 6,5) que pueden conducir a síntomas de deficiencia (Vance et al. 2003). En estas condiciones, un aumento de temperatura y / o reducción de pH es más efectivo que las enmiendas adicionales de fertilizantes de fósforo. El exceso de P puede reducir o bloquear la absorción de algunos otros nutrientes (por ejemplo, K, Cu, Fe) (Fig. 4.7). La deficiencia de fósforo se manifiesta en un color verde-violeta de las hojas más viejas, que puede seguir a la clorosis y la necrosis además del retraso en el crecimiento del ápice vegetativo. Sin embargo, estos síntomas no son específicos y hacen que las deficiencias de P sean difíciles de identificar (Uchida 2000).

Calcio (Ca): El calcio participa en la formación de la pared celular, la permeabilidad de la membrana, la división y extensión celular. La buena disponibilidad le da a la planta una mayor resistencia a los ataques de hongos y las infecciones bacterianas (Liu et al. 2014). La absorción está muy relacionada con el flujo de agua entre las raíces y las partes aéreas. Su movimiento se produce a través de la xilema y, por lo tanto, está particularmente influenciado por las bajas temperaturas a nivel de la raíz, por el suministro reducido de agua (sequía o salinidad de la solución) o por la humedad relativa excesiva del aire. Como el Ca no es móvil dentro de la planta, las deficiencias comienzan desde las partes formadas más recientemente (Adams 1991; Adams y Ho 1992; Ho et al. 1993). Los síntomas principales son retraso en el crecimiento de las plantas, deformación de los márgenes de las hojas más jóvenes, coloración verde clara o algunas veces clorótica de nuevos tejidos y un sistema radicular atrofiado sin raíces finas. Las deficiencias se muestran de diferentes maneras, pej. pudrición apical en tomate y / o dorado marginal de hojas en lechuga.

Magnesio (Mg): El magnesio interviene en la constitución de las moléculas de clorofila. Se inmoviliza a valores de pH inferiores a 5,5 y entra en competencia con la absorción de K y Ca (Fig. 4.7). Los síntomas de deficiencia son el amarillamiento entre las venas de las hojas y la clorosis interna de las hojas basales. Como el Mg se puede movilizar fácilmente, las plantas deficientes en magnesio primero descomponen la clorofila en las hojas más viejas y transportan el Mg a las hojas más jóvenes. Por lo tanto, el primer

signo de deficiencia de magnesio es la clorosis intervenal en las hojas más viejas, a diferencia de la deficiencia de hierro donde la clorosis intervenal aparece primero en las hojas más jóvenes (Sonneveld y Voogt, 2009).

Azufre (S): El azufre es requerido por la planta en cantidades comparables a las del fósforo, y para optimizar su absorción, debe estar presente en una proporción de 1:10 con nitrógeno (McCutchan et al. 2003). Se absorbe como sulfato. Las deficiencias no se detectan fácilmente, ya que los síntomas pueden confundirse con los de la deficiencia de nitrógeno, excepto que la deficiencia de nitrógeno comienza a manifestarse en las hojas más viejas, mientras que la de azufre de las más jóvenes (Schnug y Haneklaus 2005). La nutrición del S tiene un papel importante en la mejora de los daños en el aparato fotosinético causados por la deficiencia de Fe (hierro) (Muneer et al. 2014).

Hierro (Fe): El hierro es uno de los micronutrientes más importantes porque es clave en muchos procesos biológicos como la fotosíntesis (Briat et al. 2015; Heuvelink y Kierkels 2016). Para mejorar su absorción, el pH de la solución nutritiva debe estar alrededor 5,5–6,0, y no se debe permitir que el contenido de Mn sea demasiado alto porque los dos elementos posteriormente entran en competencia (Fig. 4.7). La proporción óptima de Fe– Mn es de alrededor de 2:1 para la mayoría de los cultivos (Sonneveld y Voogt 2009). A bajas temperaturas, la eficiencia de asimilación se reduce. Los síntomas de deficiencia se caracterizan por clorosis intervenal desde las hojas jóvenes hacia las basales más viejas, y por un crecimiento reducido del sistema de raíces. Los síntomas de deficiencia no siempre se deben a la baja presencia de Fe en la solución nutritiva, pero a menudo se deben a la falta de Fe disponible para la planta. El uso de agentes quelantes garantiza la disponibilidad constante de Fe para la planta.

Cloro (Cl): El cloro se ha considerado recientemente como un micronutriente, incluso si su contenido en plantas (0,2–2,0% dw) es bastante alto. Es fácilmente absorbido por la planta y es muy móvil dentro de ella. Está involucrado en el proceso fotosintético y la regulación de la apertura de las estomas. Las deficiencias, que son poco frecuentes, ocurren con los síntomas típicos de la desecación de las hojas, especialmente en los márgenes. Mucho más extendido es el daño debido a un exceso de Cl que conduce a una contracción visible de la planta que es relativa a las diferentes sensibilidades de las diferentes especies. Para evitar daños a los cultivos, siempre es aconsejable verificar el contenido de Cl en el agua utilizada para preparar soluciones nutritivas y elegir fertilizantes adecuados (por ejemplo, K_2SO_4 en lugar de Kcl).

Sodio (Na): El sodio, en exceso, es perjudicial para las plantas, ya que es tóxico e interfiere con la absorción de otros iones. El antagonismo con K (Fig. 4.7), por ejemplo, no siempre es dañino porque en algunas especies (por ejemplo, tomates), mejora el sabor de la fruta, mientras que en otras (por ejemplo, frijoles), puede reducir el crecimiento de las plantas. Similar al Cl, es importante conocer la concentración en el agua utilizada para preparar la solución nutritiva (Sonneveld y Voogt 2009).

Manganeso (Mn): El manganeso forma parte de muchas coenzimas y está involucrado en la extensión de las células de la raíz y su resistencia a los patógenos. Su disponibilidad está controlada por el pH de la solución nutritiva y por la competencia con otros nutrientes (Fig. 4.7). Los síntomas de deficiencia son similares a los de Fe, excepto por la aparición de áreas ligeramente hundidas en las áreas intervenosas (Uchida 2000). Se pueden hacer correcciones agregando $MnSO_4$ o bajando el pH de la solución nutritiva.

Boro (B): El boro es esencial para el establecimiento de frutos y el desarrollo de semillas. Los métodos de absorción son similares a los ya descritos para Ca con los que puede competir. El pH de la solución nutritiva debe estar por debajo de 6.0 y el nivel óptimo parece estar entre 4,5 y 5,5. Los síntomas de deficiencia se pueden detectar en las nuevas estructuras que aparecen de color verde oscuro, las hojas jóvenes aumentan considerablemente su grosor y tienen una consistencia coriácea. Posteriormente pueden aparecer cloróticos y luego necróticos, con coloración oxidada.

Zinc (Zn): El zinc juega un papel importante en ciertas reacciones enzimáticas. Su absorción está fuertemente influenciada por el pH y el suministro de P de la solución nutritiva. Los valores de pH entre 5,5 y 6,5 promueven la absorción de Zn. La baja temperatura y los altos niveles de P reducen la cantidad de zinc absorbido por la planta. Las deficiencias de zinc ocurren raramente, y están representadas por manchas cloróticas en las áreas intervenosas de las hojas, entrenudos muy cortos, epinastia y de la hoja y pobre crecimiento (Gibson 2007).

Cobre (Cu): El cobre está involucrado en procesos respiratorios y fotosintéticos. Su absorción se reduce a valores de pH superiores a 6,5, mientras que valores de pH inferiores a 5,5 pueden provocar efectos tóxicos (Rooney et al. 2006). Los altos niveles de amonio y fósforo interactúan con Cu reduciendo la disponibilidad de este último. La presencia excesiva de Cu interfiere con la absorción de Fe, Mn y Mo. Las deficiencias se manifiestan por clorosis intervenal que conduce al colapso de los tejidos de las hojas que parecen desecados (Gibson 2007).

Molibdeno (Mo): El molibdeno es esencial en la síntesis de proteínas y en el metabolismo del nitrógeno. A diferencia de otros micronutrientes, está mejor disponible a valores de pH neutros. Los síntomas de deficiencia comienzan con clorosis y necrosis a lo largo de la costilla principal de las hojas viejas, mientras que las hojas jóvenes aparecen deformadas (Gibson 2007).

4.4.3 Manejo de nutrientes en relación con los requisitos de las plantas

Desde el desarrollo de los sistemas de horticultura sin suelo en la década de 1970 (Verwer 1978; Cooper 1979), se han desarrollado y ajustado diferentes soluciones de nutrientes de acuerdo con las preferencias de los productores (Tabla 4.4; De Kreij et al. 1999). Todas las mezclas siguen los principios de disponibilidad excesiva de todos los elementos para evitar deficiencias y el equilibrio entre cationes (bivalentes) para evitar la competencia entre cationes en la absorción de nutrientes de las plantas (Hoagland y Arnon 1950; Steiner 1961; Steiner 1984; Sonneveld y Voogt 2009). Comúnmente, se permite que la CE se eleve en la zona de la raíz en un grado limitado. En los tomates, por ejemplo, la solución nutritiva generalmente tiene una CE de aprox. 3 dS m^1, mientras que, en la zona de la raíz en las losas de lana de roca, la CE puede elevarse a 4–5 dS m^1. Sin embargo, en los países del norte de Europa, para el primer riego de nuevas losas de lana de roca al comienzo del ciclo de producción, la solución nutritiva puede tener una CE de hasta 5 dS m^1, saturando el sustrato de lana de roca con iones hasta una CE de 10 dS m^1, que posteriormente se lavará después de 2 semanas. Para proporcionar un enjuague suficiente de la zona de la raíz, en un sistema típico de losas de lana de roca de riego por goteo, aproximadamente el 20-50% del agua dosificada se recoge como agua de drenaje. El agua de drenaje se recicla, se filtra, se mezcla con agua dulce y se completa con nutrientes para su uso en el próximo ciclo (Van Os 1994).

En la producción de tomate, el aumento de la CE se puede aplicar para mejorar la síntesis de licopeno (promoviendo la coloración roja brillante de las frutas), sólidos solubles totales (SST) y contenido de fructosa y glucosa (Fanasca et al. 2006; Wu y Kubota 2008). Además, las plantas de tomate tienen mayores tasas de absorción de N, P, Ca y Mg y una baja absorción de K durante las primeras etapas (vegetativas). Una vez que las plantas comienzan a desarrollar frutos, la producción de hojas se ralentiza, lo que lleva a una reducción en los requerimientos de N y Ca, mientras que el requerimiento de K aumenta (por ejemplo, Zekki et al. 1996; Silber, Bar-Tal 2008). En la lechuga, por otro lado, un aumento de la CE puede promover la enfermedad por quemadura de punta durante las condiciones de creci-

miento caliente. Huett (1994) mostró una disminución significativa en el número de hojas con enfermedad por quemaduras por planta cuando la CE se redujo de 3,6 a 0,4 dS m^1, así como cuando la formulación de nutrientes K/Ca se redujo de 3,5:1 a 1,25:1. En AP, el manejo de nutrientes es más difícil que en hidroponía, ya que dependen principalmente de la densidad del stock de peces, el tipo de alimento y las tasas de alimentación.

4.4.4 Propiedades de la solución nutritiva

El fósforo es un elemento que se presenta en formas que dependen mucho del pH ambiental. En la zona de la raíz, este elemento se puede encontrar como iones PO_4^{3-}, HPO_4^{2-} y H_2PO_4, donde los dos últimos iones son las principales formas de P absorbidas por las plantas. Por lo tanto, cuando el pH es ligeramente ácido (pH 5–6), la mayor cantidad de P se presenta en una solución nutritiva (De Rijck y Schrevens 1997).

El potasio, el calcio y el magnesio están disponibles para las plantas en un amplio rango de pH. Sin embargo, la presencia de otros iones puede interferir en la disponibilidad de su planta debido a la formación de compuestos con diferentes grados de solubilidad. A un pH superior a 8,3, los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} precipitan fácilmente como carbonatos al reaccionar con CO_3^{2-}. También el sulfato forma complejos relativamente fuertes con Ca^{2+} y Mg^{2+} (De Rijck y Schrevens 1998). A medida que el pH aumenta de 2 a 9, aumenta la cantidad de SO_4^2 que forma complejos solubles con Mg^{2+} como $MgSO_4$ y con K^+ a medida que KSO_4 aumenta (De Rijck y Schrevens 1999). En general, la disponibilidad de nutrientes para la absorción de la planta a un pH superior a 7 puede estar restringida debido a una precipitación de boro, Fe^{2+}, Mn^{2+}, PO_4^3, Ca^{2+} y Mg^{2+} debido a sales insolubles y no disponibles. Los valores de pH más apropiados de la solución de nutrientes para el desarrollo de cultivos se encuentran entre 5,5 y 6,5 (Sonneveld y Voogt 2009).

4.4.5 Calidad del agua y nutrientes

La calidad del agua suministrada es extremadamente importante en los sistemas hidropónicos y AP. Para la recirculación a largo plazo, la composición química debe ser bien conocida y monitoreada con frecuencia para evitar un desequilibrio en el suministro de nutrientes, pero también para evitar la acumulación de ciertos elementos que conducen a la toxicidad. De Kreij y Col. (1999) hicieron una descripción general de las demandas químicas de la calidad del agua para los sistemas hidropónicos.

Antes de comenzar, se debe hacer un análisis del suministro de agua en los macro y micro elementos. Basado en el análisis, se puede hacer un esquema para la solución nutritiva. Por ejemplo, si se usa agua de lluvia, se debe prestar especial atención a Zn cuando la recolección se realiza a través de canales no tratados. En el agua del grifo, pueden aparecer problemas con Na, Ca, Mg, SO_4 y HCO_3. Además, se puede usar agua superficial y de pozo que también puede contener cantidades de Na, Cl, K, Ca, Mg, SO_4 y Fe, pero también micro elementos como Mn, Zn, B y Cu. Cabe señalar que todas las válvulas y tuberías deben estar hechas de materiales sintéticos como PVC y PE, y que no contengan piezas de Ni o Cu.

A menudo sucede que los suministros de agua contienen una cierta cantidad de Ca y Mg; por lo tanto, el contenido debe restarse de la cantidad en la solución nutritiva para evitar la acumulación de estos iones. HCO_3 tiene que ser compensado preferiblemente por ácido nítrico, aproximadamente 0,5 mmol L^1 que puede mantenerse como un tampón de pH en la solución nutritiva. El ácido fosfórico y el ácido sulfúrico también se pueden usar para compensar el pH, pero ambos darán rápidamente un exceso de H_2PO_4 o SO_4^2 en la solución nutritiva. En los sistemas AP, el ácido nítrico (HNO3) y el hidróxido de potasio (KOH) también se pueden utilizar para regular el pH y al mismo tiempo suministrar macronutrientes en el sistema (Nozzi et al. 2018)

4.4.5.1 Gestión de la calidad del agua

Para la formulación de soluciones nutritivas, se utilizan preferiblemente fertilizantes simples (granulados, en polvo o líquidos) y sustancias (por ejemplo, compuestos ácidos) que afectan el pH. La integración de los elementos nutrientes en la solución tiene en cuenta los valores óptimos de las cantidades de cada elemento. Esto debe hacerse en relación con los requisitos de la especie y sus cultivares considerando las fases fenológicas y el sustrato. El cálculo de los suplementos nutricionales debe realizarse teniendo en cuenta las condiciones del agua utilizada, de acuerdo con un *estricto conjunto de prioridades*. En la escala de prioridad, el magnesio y los sulfatos se colocan en la parte inferior, al mismo nivel, porque tienen menos importancia nutricional y las plantas no presentan daños, incluso si su presencia es abundante en la solución nutritiva. Esta característica tiene una retroalimentación práctica ventajosa, ya que permite una explotación de los dos elementos para equilibrar la composición nutricional con respecto a otros macronutrientes cuya deficiencia o exceso puede ser negativo para la producción. Como ejemplo, podemos considerar una solución nutritiva donde se requiere una integración de solo potasio o solo nitrato. Las sales a utilizar, en este caso, son respectivamente sulfato de

potasio o nitrato de magnesio. De hecho, si se usaran el nitrato de potasio o el nitrato de calcio más comunes, los niveles de nitrato, en el primer caso, y de calcio, en el segundo caso, aumentarían automáticamente. Además, cuando el análisis del agua utilizada muestra un desequilibrio entre cationes y aniones, y para poder calcular una solución nutritiva con la CE en equilibrio, la corrección de los valores del agua se lleva a cabo reduciendo los niveles de magnesio y / o sulfatos

Los siguientes puntos proporcionan pautas para la formulación de soluciones nutritivas:

1. Definición de las especies y requerimientos de cultivares. Es necesario tener en cuenta el ambiente de cultivo y las características del agua. Para satisfacer las necesidades de las plantas en períodos cálidos y con radiación intensa, la solución debe tener un contenido más bajo de EC y K, lo que contrasta con una mayor cantidad de Ca. En cambio, cuando la temperatura y el brillo alcanzan niveles subóptimos, es aconsejable elevar los valores de la CE y K reduciendo los valores de Ca. Es importante tener en cuenta con respecto a los cultivares que existen variaciones sustanciales, especialmente para los valores del NO_3, debido al diferente vigor de la vegetación. de los cultivares Para los tomates, de hecho, se usan 15 mmol L^1 de NO_3 en promedio (Tabla 4.4), y en el caso de cultivares caracterizados por un bajo vigor vegetativo y en ciertas fases fenológicas (p. ej., cuajado de frutos del cuarto truss), hasta se adopta 20 mM L^1 de NO_3. En caso de que algunos elementos como Na sean presente en el agua, para reducir su efecto, que es particularmente negativo para algunos cultivos, será necesario aumentar la cantidad de NO_3 y Ca y posiblemente disminuir el K, manteniendo la EC al mismo nivel.

2. Los cálculos de requerimientos de nutrientes deben obtenerse restando los valores de los elementos químicos del agua de los elementos químicos definidos anteriormente. Por ejemplo, la necesidad establecida de Mg de pimientos (Capsicum sp.) Es 1.5 mM L 1, que tiene el agua a 0.5 mM L 1, y 1.0 mM L 1 de Mg debe agregarse al agua (requisito 1.5 - suministro de agua 0.5 ¼ 1.0).

3. Elección y cálculo de fertilizantes y ácidos a utilizar. Por ejemplo, teniendo que proporcionar Mg, como en el ejemplo del punto 2 anterior, se puede usar MgSO4 o Mg (NO3) 2. Se tomará una decisión teniendo en cuenta la contribución colateral del sulfato o nitrato a medida quell.

4.4.6 Comparación entre hidropónico y acuapónico Producción.

Tabla 4.4
Soluciones de nutrientes en el cultivo hidropónico de lechuga (DFT) tomate, pimiento y pepino (losas de Lana de Roca con riego por goteo) en los Países Bajos (De Kreij et al. 1999).

	pH	EC	NH_4	K	Ca	Mg	NO_3	SO_4
		dS m^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}
Lechuga(Wageningen UR)	5.9	1.7	1.0	4.4	4.5	1.8	10.6	1.5
Lechuga	5.8	1.2	0.7	4.8	2.3	0.8	8.9	0.8
Lechuga	5.8	1.2	-	3.0	2.5	1.0	7.5	1.0
Tomato generativo	5.5	2.6–3.0	1.2	13.0	4.2	1.9	15.4	4.7
Tomato vegetativo	5.5	2.6	1.2	8.3	5.7	2.7	15.4	4.7
Pepino	5.5	3.2	1.2	10.4	6.7	2.0	23.3	1.5–2.0
Pimineta	5.6	2.5–3.0	1.2	5–7	4–5	2.0	17.0	1.8–2.0
Propagación plantas	5.5	2.3	1.2	6.8	4.5	3.0	16.8	2.5

	pH	P	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
		mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}	mmol L^{-1}
Lechuga(Wageningen UR)	5.9	1.5	28.1	1.5	6.4	47.0	1.0	0.7
Lechuga	5.8	1.0	35.1	4.9	3.0	18.4	0.5	0.5
Lechuga	5.8	0.5	50.0	3.7	0.6	4.8	0.5	0.01
Tomato generativo	5.5	1.5	15.0	10.0	5.0	30.0	0.8	0.5
Tomato vegetativo	5.5	1.5	15.0	10.0	5.0	30.0	0.8	0.5
Pepino	5.5	1.5–2.0	15.0	10.0	5.0	25.0	0.8	0.5
Pimineta	5.6	1.5–2.5	25.0	10.0	7.0	30.0	1.0	0.5
Propagación plantas	5.5	1.3	25.0	10.0	5.0	35.0	1.0	0.5

Adoptado y modificado de Vermeulen (2016, comunicación personal)

Durante su ciclo de vida, las plantas necesitan varios macro y micro elementos esenciales para el desarrollo regular (boro, calcio, carbono, cloro, cobre, hidrógeno, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo, potasio, azufre, zinc), generalmente se absorbe de la solución nutritiva (Bittsanszky et al.2016). La concentración y la proporción de nutrientes entre ellas son las variables más importantes capaces de influir en la absorción de las plantas. En los sistemas AP, los desechos metabólicos de los peces contienen nutrientes para las plantas, pero se debe tener en cuenta, especialmente a escalas comerciales, que las concentraciones de nutrientes suministradas por los peces en los sistemas AP son significativamente más bajas y desequilibradas para la mayoría de los nutrientes en comparación con los sistemas hidropónicos (Nicoletto et al.2018). Por lo general, en AP, con tasas adecuadas de almacenamiento de peces, los niveles de nitrato son suficientes para un buen crecimiento de la planta, mientras que los niveles de K y P son generalmente insuficientes para el crecimiento máximo de la planta. Además, el calcio y el hierro también podrían estar limitados. Esto puede reducir el rendimiento y la calidad del cultivo, por lo que la integración de nutrientes debe llevarse a cabo para apoyar una reutilización eficiente de nutrientes. Las comunidades microbianas juegan un papel crucial en la dinámica de nutrientes de los sistemas AP (Schmautz et al.2017), convirtiendo amonio en nitrato, pero también contribuyendo al procesamiento de partículas y desechos disueltos en el sistema (Bittsanszky et al. 2016) La absorción de N y P de las plantas representa solo una fracción de la cantidad eliminada del agua (Trang y Brix 2014), lo que indica que los procesos microbianos en la zona de la raíz de las plantas y en el sustrato (si está presente) y en todo el sistema, Juega un papel importante. La composición de los alimentos para peces depende del tipo de pescado y esto influye liberación de nutrientes del rendimiento metabólico de los peces. Típicamente, el alimento para peces contiene una fuente de energía (carbohidratos y / o lípidos), aminoácidos esenciales, vitaminas, así como otras moléculas orgánicas que son necesarias para el metabolismo normal, pero algunas son las que los peces

Las células no pueden sintetizar. Además, debe tenerse en cuenta que los requisitos nutricionales de una planta varían según la especie (Nozzi et al. 2018), la variedad, la etapa del ciclo de vida, la duración del día y las condiciones climáticas y recientemente (Parent et al. 2013; Baxter 2015), la ley de Liebig (el crecimiento de las plantas está controlado por el recurso más escaso) ha sido reemplazado por algoritmos complejos que consideran las interacciones entre los nutrientes individuales. Ambos aspectos no permiten una evaluación simple de los efectos de los cambios en las concentraciones de nutrientes en los sistemas hidropónicos o AP.

Por lo tanto, surge la pregunta de si es necesario y efectivo agregar nutrientes a los sistemas AP. Según lo informado por Bittsanszky et al. (2016), los sistemas AP solo pueden funcionar de manera eficiente y, por lo tanto, exitosamente, si se toma especial cuidado a través del monitoreo continuo de la composición química del agua recirculante para concentraciones y proporciones adecuadas de nutrientes y del componente potencialmente tóxico, el amonio. La necesidad de agregar nutrientes depende de las especies de plantas y la etapa de crecimiento. Con frecuencia, aunque la densidad de peces es óptima para el suministro de nitrógeno, la adición de P y K con fertilizantes minerales, al menos, debe llevarse a cabo (Nicoletto et al. 2018). A diferencia de, por ejemplo, la lechuga, los tomates que necesitan dar fruto y madurar, necesitan nutrientes suplementarios. Para calcular estas necesidades, se puede utilizar un software, como HydroBuddy, que es un software gratuito (Fernández 2016) que se utiliza para calcular la cantidad de suplementos de nutrientes minerales necesarios.

4.5 Desinfección de la solución nutritiva de recirculación.

Para minimizar el riesgo de propagación de patógenos transmitidos por el suelo, se requiere la desinfección de la solución de nutrientes circulante (Postma et al. 2008). Tratamiento térmico (Runia et al.1988) fue el primer método utilizado. Van Os (2009) hizo una descripción general de los métodos más importantes y a continuación se ofrece un resumen. La recirculación de la solución nutritiva abre posibilidades para ahorrar agua y fertilizantes (Van Os 1999). La gran desventaja de la recirculación de la solución nutritiva es el creciente riesgo de propagación de patógenos transmitidos por las raíces por todo el sistema de producción. Para minimizar tales riesgos, la solución debe tratarse antes de reutilizarse. El uso de pesticidas para dicho tratamiento es limitado ya que los pesticidas efectivos no están disponibles para todos estos patógenos, y si están disponibles, puede aparecer resistencia y la legislación ambiental restringe la descarga de agua con pesticidas (y nutrientes) al medio ambiente (Parlamento Europeo y Consejo Europeo 2000). Además, en los sistemas AP, el uso de pesticidas ejerce efectos negativos sobre la salud de los peces y no puede llevarse a cabo, incluso si las partes hidropónicas y AP del sistema están en habitaciones diferentes, porque la pulverización de productos químicos puede ingresar a la solución de nutrientes a través del agua de condensación o mediante pulverización directa sobre las losas de sustrato. En vista de esto, se puede adoptar un enfoque de control biológico para controlar las enfermedades de plagas, y se puede acceder a él a través de la Hoja de datos del Centro de Acuaponía de la UE (Centro de Acuaponía de la UE). Al

mismo tiempo, se pueden observar problemas similares para el tratamiento de peces con medicamentos veterinarios que no son compatibles con el ciclo de la planta.

4.5.1 Descripción métodos de desinfección.

La desinfección de la solución de nutrientes circulante debe realizarse continuamente. Todo el drenaje devuelto (10-12 h durante el día) debe tratarse dentro de las 24 h. Para un invernadero de 1000 m^2 en un cultivo de sustrato (lana de roca, fibra de coco, perlita), se necesita una capacidad de desinfección de aproximadamente 1-3 m^3 por día para desinfectar un excedente estimado del 30% del agua suministrada con riego por goteo al tomate plantas durante un período de 24 h en condiciones de verano. Debido a la tasa de retorno variable del agua de drenaje, se necesita un tanque de captación suficientemente grande para el agua de drenaje en el que el agua se almacena antes de bombearla a la unidad de desinfección. Después de la desinfección, se requiere otro tanque para almacenar el agua limpia antes de ajustar la CE y el pH y mezclar con agua nueva para suministrar a las plantas. Ambos tanques tienen un tamaño promedio de 5 m^3 por1000 m^2. En un sistema de película de nutrientes (NFT), se deben desinfectar diariamente alrededor de 10 m^3 por día. Generalmente se considera que tal capacidad no es económica para desinfectar (Ruijs 1994). DFT requiere un tratamiento similar. Esta es la razón principal por la cual las unidades de producción de NFT y DFT normalmente no desinfectan la solución nutritiva. La desinfección se lleva a cabo por métodos no químicos o químicos de la siguiente manera:

4.5.1.1 Métodos no químicos

En general, estos métodos no alteran la composición química de la solución, y no hay acumulación de residuos:

1. *Tratamiento térmico:* Calentar el agua de drenaje a temperaturas lo suficientemente altas como para erradicar las bacterias y los patógenos es el método más confiable para la desinfección. Cada tipo de organismo tiene su propia temperatura letal. Las bacterias que no forman esporas tienen temperaturas letales entre 40 y 60 C, hongos entre 40 y 85 C, nematodos entre 45 y 55 C y virus entre 80 y 95 C (Runia et al. 1988) a un tiempo de exposición de 10 s. En general, el punto de ajuste de temperatura de 95 C es lo suficientemente alto como para matar a la mayoría de los organismos que pueden causar enfermedades con un tiempo mínimo de 10 s. Si bien esto puede parecer muy intensivo en energía, debe tenerse en cuenta que la energía se recupera y se reutiliza con intercambiadores de calor. La disponibilidad de una fuente de energía barata es de

mayor importancia para la aplicación práctica.

2. *Radiación UV:* Es radiación electromagnética con una longitud de onda entre 200 y 400 nm. Las longitudes de onda entre 200 y 280 nm (UV-C), con un óptimo a 254 nm, tienen un fuerte efecto mortal sobre los microorganismos, ya que minimiza la multiplicación de las cadenas de ADN. Se necesitan diferentes niveles de radiación para diferentes organismos a fin de lograr el mismo nivel de eficacia. Runia (1995) recomienda una dosis que varía de 100 mJ cm2 para eliminar bacterias y hongos a 250 mJ cm2 para eliminar virus. Estas dosis relativamente altas son necesarias para compensar las variaciones en la turbidez del agua y las variaciones en la penetración de la energía en la solución debido a la baja turbulencia alrededor de la lámpara UV o las variaciones en la salida de la lámpara UV. Zoschke y col. (2014) revisaron que la irradiación UV a 185 y 254 nm ofrece agua orgánica control de contaminantes y desinfección. Además, Moriarty et al. (2018) informaron que la radiación UV inactiva eficientemente coliformes en sistemas AP.

3. *Filtración:* Se puede utilizar para eliminar cualquier material no disuelto de la solución nutritiva. Hay varios tipos de filtros disponibles en relación con el rango de tamaños de partícula. Los filtros de arena rápidos se utilizan a menudo para eliminar partículas grandes del agua de drenaje antes de agregar, medir y controlar la CE, el pH y la aplicación de nuevos fertilizantes. Después de pasar la unidad de fertilizante, a menudo se construye un filtro sintético fino (50–80 um) en el flujo de agua para eliminar las sales o precipitados de fertilizante no disueltos para evitar la obstrucción de los goteros de riego. Estos filtros sintéticos también se usan como pretratamiento para métodos de desinfección con tratamiento térmico, tratamiento con ozono o radiación UV. Con reducciones en el tamaño de poro de la filtración, el flujo se inhibe, por lo que la eliminación de partículas muy pequeñas requiere una combinación de filtros adecuados y alta presión, seguido de una limpieza frecuente de los filtros. La eliminación de patógenos requiere tamaños de poro relativamente pequeños (<10 μm; los llamados micro, ultra o nano filtración).

4.5.1.2 Métodos químicos

1. *Ozono (O_3):* Se produce a partir del aire seco y la electricidad utilizando un generador de ozono (que convierte $3O_2 \longrightarrow 2O_3$). El aire enriquecido con ozono se inyecta en el agua que se desinfecta y almacena durante un período de 1 h. Runia (1995) concluyó que un suministro de ozono de 10 g por hora por m^3 de agua de drenaje con un tiempo de exposición de 1 h es suficiente para eliminar todos los patógenos, incluidos los virus.

Nicoletto et al. También han observado la reducción de las poblaciones microbianas en la producción de vegetales en sistemas sin suelo manejados con ozono. (2017) Debe evitarse la exposición humana al ozono que sale del sistema o de los tanques de almacenamiento, ya que incluso un tiempo de exposición corto de una concentración de 0.1 mg Lt de ozono puede causar irritación de las membranas mucosas. Un inconveniente del uso de ozono es que reacciona con el quelato de hierro, como lo hace la radiación UV. En consecuencia, se requieren dosis más altas de hierro y se deben tomar medidas para tratar los depósitos de hierro en el sistema. La investigación reciente (Van Os 2017) con instalaciones contemporáneas de ozono parece prometedora, donde se logra la eliminación completa de los patógenos y la descomposición de los pesticidas restantes, sin problemas de seguridad.

2. *Peróxido de hidrógeno (H_2O_2):* Es un agente oxidante fuerte e inestable que reacciona para formar H_2O y un radical O-. Los llamados activadores comerciales se agregan a la solución para estabilizar la solución original y aumentar la eficacia. Los activadores son principalmente ácido fórmico o ácido acético, que disminuyen el pH en la solución nutritiva. Se recomiendan diferentes dosis (Runia 1995) contra *Pythium* spp. (0.005%), otros hongos (0,01%), como *Fusarium* y virus (0,05%). La concentración de 0.05% también es dañina para las raíces de las plantas. El peróxido de hidrógeno es especialmente útil para limpiar el sistema de riego, mientras que el uso para la desinfección ha sido asumido por otros métodos. El método se considera económico, pero no eficiente.

3. *Hipoclorito de sodio (NaOCl):* Es un compuesto que tiene diferentes nombres comerciales (por ejemplo, lejía doméstica) con diferentes concentraciones, pero con la misma estructura química (NaOCl). Es ampliamente utilizado para el tratamiento del agua, especialmente en piscinas. El producto es relativamente barato. Cuando se agrega al agua, el hipoclorito de sodio se descompone en HOCl y NaOH y dependiendo del pH a OCl; este último se descompone en Cl y O. para una fuerte oxidación. Reacciona directamente con cualquier sustancia orgánica, y si hay suficiente hipoclorito, también reacciona con patógenos. Le Quillec y col. (2003) mostraron que la tenacidad del hipoclorito depende de las condiciones climáticas y las reacciones de descomposición relacionadas. Las altas temperaturas y el contacto con el aire causan una descomposición rápida, a la que se forma $NaClO_3$ con propiedades fitotóxicas. Runia (1995) demostró que el hipoclorito no es efectivo para eliminar virus. La cloración con una concentración de 1–5 mg Cl L^{-1} y un tiempo de exposición de 2 h logró una reducción del 90–99,9% de *Fusarium oxysporum*, pero algunas esporas sobrevivieron a todas las

concentraciones. Deben tomarse medidas de seguridad para un almacenamiento y manipulación seguros. El hipoclorito podría funcionar contra una serie de agentes patógenos, pero no todos, pero al mismo tiempo, la concentración de Na^+ y Cl^- aumenta en un sistema de crecimiento cerrado que también conducirá a niveles que disminuirán la productividad del cultivo y en ese momento la solución nutritiva tiene para ser lixiviado a pesar de los inconvenientes mencionados anteriormente, los agentes comerciales utilizan y recomiendan el producto como un método económico y útil.

4.5.2 Métodos químicos Vs No-químicos

Los productores prefieren métodos de desinfección con excelente rendimiento en combinación con bajos costos. Se puede describir un buen rendimiento eliminando los patógenos con una reducción del 99,9% (o una reducción de log 3) combinada con un proceso claro, comprensible y controlable. Los bajos costos se combinan preferiblemente con bajas inversiones, bajos costos de mantenimiento y sin necesidad de que el productor se desempeñe como especialista de laboratorio. El tratamiento térmico, la radiación UV y el tratamiento con ozono muestran un buen rendimiento. Sin embargo, las inversiones en el tratamiento del ozono son muy altas, lo que resulta en altos costos anuales. El tratamiento térmico y la radiación UV también tienen altos costos anuales, pero las inversiones son más bajas, mientras que el proceso de eliminación es fácil de controlar. Los dos últimos métodos son más populares entre los productores, especialmente en viveros más grandes que 1 o 2 ha. La filtración lenta de arena es menos perfecta en rendimiento, pero tiene costos anuales considerablemente más bajos. Este método podría recomendarse para productores más pequeños que 1 ha y para los productores con menor capital de inversión, ya que los propios productores pueden construir filtros de arena. El hipoclorito de sodio y el peróxido de hidrógeno también son métodos baratos, pero el rendimiento es insuficiente para eliminar todos los patógenos. Además, es un biocida y no un pesticida, lo que significa que, por ley, en la UE, al menos, está legalmente prohibido su uso para la eliminación de patógenos.

4.5.3 Bioincrustaciones y pretratamiento

Los métodos de desinfección no son muy selectivos entre los patógenos y otros materiales orgánicos en la solución. Por lo tanto, se recomienda el pretratamiento (filtros de arena rápidos o filtros mecánicos de 50–80 um)

de la solución antes de la desinfección en el tratamiento térmico, la radiación UV y el tratamiento con ozono. Si después de la desinfección los residuos de los métodos químicos permanecen en el agua, pueden reaccionar con las biopelículas que se han formado en las tuberías de los sistemas de riego. Si la biopelícula se libera de las paredes de las tuberías, se transportarán a los goteros y se obstruirán. Varios métodos de oxidación (hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno con activadores, dióxido de cloro) se utilizan principalmente para limpiar tuberías y equipos, y estos crean un riesgo especial de obstruir los goteros con el tiempo.

REFERENCIAS

Abad M, Noguera P, Puchades R, Maquieira A, Noguera V (2002) Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. Bioresour Technol 82:241–245

Adams P (1991) Effect of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality and composition of tomatoes grown in rockwool. J Hortic Sci 66:201–207

Adams P, Ho LC (1992) The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. J Hortic Sci 67:827–839

Baxter I (2015) Should we treat the ionome as a combination of individual elements, or should we be deriving novel combined traits? J Exp Bot 66:2127–2131

Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge R, Villarroel M, Kotzen B, Komives T (2016) Nutrient supply of plants in aquaponic systems. Ecocycles 2:17–20

Blok C, de Kreij C, Baas R, Wever G (2008) Analytical methods used in soilless cultivation. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 245–290

Briat JF, Dubos C, Gaymard F (2015) Iron nutrition, biomass production, and plant product quality.Trends Plant Sci 20:33–40

Bunt BR (2012) Media and mixes for container-grown plants: a manual on the preparation and use of growing media for pot plants. Springer, Dordrecht

Cooper A (1979) The ABC of NFT. Grower Books, London

Cortella G, Saro O, De Angelis A, Ceccotti L, Tomasi N, Dalla Costa L, Manzocco L, Pinton R, Mimmo T, Cesco S (2014) Temperature control of nutrient solution in floating system cultiva- tion. Appl Therm Eng 73:1055–1065

De Kreij C, Voogt W, Baas R (1999) Nutrient solutions and water quality for soilless cultures, report 196. Research station for Floriculture and Glasshouse Vegetables, Naaldwijk, p 36

De Rijck G, Schrevens E (1997) pH influenced by the elemental composition of nutrient solutions. J Plant Nutr 20:911–923

De Rijck G, Schrevens E (1998) Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to complexation reactions. J Plant Nutr 21:2103–2113

De Rijck G, Schrevens E (1999) Anion speciation in nutrient solutions as a function of pH. J Plant Nutr 22:269–279

Dong S, Scagel CF, Cheng L, Fuchigami LH, Rygiewicz PT (2001) Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. Tree Physiol 21:541–547

Dorais M, Menard C, Begin G (2006) Risk of phytotoxicity of sawdust substrates for greenhouse vegetables. In: XXVII International Horticultural Congress-IHC2006: International symposium on advances in environmental control, automation 761, pp 589–595

Enzo M, Gianquinto G, Lazzarin R, Pimpini F, Sambo P (2001) Principi tecnico-agronomici della fertirrigazione e del fuori suolo. In: Tipografia-Garbin. Padova, Italy EU Aquaponics Hub. Plant Protection Fact Sheet. http://euaquaponicshub.com/hub/wp-content/uploads/2016/05/Plant-protection-factsheet.pdf

European Parliament and European Council (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parlia- ment and the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy (short: Water Framework Directive) Off J Eur Communities, p 327/1

Fageria NK, Baligar VC, Clark RB (2002) Micronutrients in crop production. Adv Agron 77:185–268

Fanasca S, Colla G, Maiani G, Venneria E, Rouphael Y, Azzini E, Saccardo F (2006) Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition. J Agric Food Chem 54:4319–4325

Fernandez D (2016) HydroBuddy v1.50: The first free Open source hydroponic nutrient calculator program Available Online [WWW document]. Sci Hydroponics. http://scienceinhydroponics. com/

Fornes F, Belda RM, Abad M, Noguera P, Puchades R, Maquieira A, Noguera V (2003) The microstructure of coconut coir dusts for use as alternatives to peat in soilless growing media. Aust J Exp Agr 43:1171–1179

Gibson JL (2007) Nutrient deficiencies in bedding plants. Ball Publishing, Batavia

Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85

Haynes RJ (1990) Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: a critical examina- tion of their role in regulating rhizosphere pH. Plant Soil 126:247–264
Heuvelink E, Kierkels T (2016) Iron is essential for photosynthesis and respiration: iron deficiency. In Greenhouses: the international magazine for greenhouse growers 5, pp 48–49
Ho LC, Belda R, Brown M (1993) Uptake and transport of calcium and the possible causes of blossom-end rot in tomato. J Exp Bot 44:509–518
Hoagland DR, Arnon DI (1950) The water culture method for growing plants without soil, Circular 347, Agricultural Experimental station, University of California, Berkeley, CA, USA
Huett DO (1994) Growth, nutrient uptake and tipburn severity of hydroponic lettuce in response to electrical conductivity and K:Ca ratio in solution. Aust J Agric Res 45:251–267
Hussain A, Iqbal K, Aziem S, Mahato P, Negi AK (2014) A review on the science of growing crops without soil (soilless culture)-a novel alternative for growing crops. Int J Agric Crop Sci 7:833–842
Jensen MH, Collins WL (1985) Hydroponic vegetable production. Hortic Rev 7:483–558
Kipp JA, Wever G, de Kreij C (2001) International substrate manual. Elsevier, Amsterdam
Kuhry P, Vitt DH (1996) Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. Ecology 77:271–275
Lamanna D, Castelnuovo M, D'Angelo G (1990) Compost-based media as alternative to peat on ten pot ornamentals. Acta Hortic 294:125–130
Le Bot J, Adamowicz S, Robin P (1998) Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. Sci Hortic 74:47–82
Le Quillec S, Fabre R, Lesourd D (2003) Phytotoxicité sur tomate et chlorate de sodium. Infos-ctifl, pp 40–43
Liu S, Hou Y, Chen X, Gao Y, Li H, Sun S (2014) Combination of fluconazole with non-antifungal agents: a promising approach to cope with resistant Candida albicans infections and insight into new antifungal agent discovery. Int J Antimicrob Agents 43:395–402
Maher MJ, Prasad M, Raviv M (2008) Organic soilless media components. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 459–504
Marschner P (2012) Rhizosphere biology. In: Marschner's mineral nutrition of higher plants, 3rd edn. Academic, Amsterdam, pp 369–388
Masclaux-Daubresse C, Daniel-Vedele F, Dechorgnat J, Chardon F, Gaufichon L, Suzuki A (2010) Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. Ann Bot 105:1141–1157
Maucieri C, Nicoletto C, Junge R, Schmautz Z, Sambo P, Borin M (2018)

Hydroponic systems and water management in aquaponics: a review. Ital J Agron 13:1–11
McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C, McGrath CC (2003) Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. Oikos 102:378–390
Moriarty MJ, Semmens K, Bissonnette GK, Jaczynski J (2018) Inactivation with UV-radiation and internalization assessment of coliforms and Escherichia coli in aquaponically grown lettuce. LWT 89:624–630
Muneer S, Lee BR, Kim KY, Park SH, Zhang Q, Kim TH (2014) Involvement of Sulphur nutrition in modulating iron deficiency responses in photosynthetic organelles of oilseed rape (Brassica napus L.). Photosynth Res 119:319–329
NGS, Multilayer. http://ngsystem.com/en/ngs/multibanda
Nicoletto C, Maucieri C, Sambo P (2017) Effects on water management and quality characteristics of ozone application in chicory forcing process: a pilot system. Agronomy 7:29
Nicoletto C, Maucieri C, Mathis A, Schmautz Z, Komives T, Sambo P, Junge R (2018) Extension of aquaponic water use for NFT baby-leaf production: mizuna and rocket salad. Agronomy 8:75
Nozzi V, Graber A, Schmautz Z, Mathis A, Junge R (2018) Nutrient management in aquaponics: comparison of three approaches for cultivating lettuce, mint and mushroom herb. Agronomy 8:27
Olle M, Ngouajio M, Siomos A (2012) Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. Agriculture 99:399–408
Parent S-É, Parent LE, Egozcue JJ, Rozane D-E, Hernandes A, Lapointe L, Hébert-Gentile V, Naess K, Marchand S, Lafond J, Mattos D, Barlow P, Natale W (2013) The plant ionome revisited by the nutrient balance concept. Front Plant Sci 4:39
Perelli M, Graziano PL, Calzavara R (2009) Nutrire le piante. Arvan Ed., Venice.
Pickering HW, Menzies NW, Hunter MN (2002) Zeolite/rock phosphate – a novel slow release phosphorus fertiliser for potted plant production. Sci Hortic 94:333–343
Postma J, van Os EA, Bonants PJM (2008) Pathogen detection and management strategies in soilless plant growing systems. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 425–458
Pregitzer KS, King JS (2005) Effects of soil temperature on nutrient uptake. In: Nutrient acquisition by plants. Springer, Berlin/Heidelberg, pp 277–310
Rooney CP, Zhao FJ, McGrath SP (2006) Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. Environ Toxicol Chem 25:726–732
Ruijs MNA (1994) Economic evaluation of closed production systems in

glasshouse horticulture. Acta Hortic 340:87–94
Runia WT (1995) A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless culture. Acta Hortic 382:221–229
Runia WT, van Os EA, Bollen GJ (1988) Disinfection of drain water from soilless cultures by heat treatment. Neth J Agric Sci 36:231–238
Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits TH (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199:613–620
Schnug E, Haneklaus S (2005) Sulphur deficiency symptoms in oilseed rape (Brassica napus L.)- the aesthetics of starvation. Phyton 45:79–95
Silber A, Bar-Tal A (2008) Nutrition of substrate-grown plants. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 292–342
Sonneveld C, Voogt W (2009) Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, p 403
Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant Soil 15:134–154
Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. In: Proceeding 6th International congress on soilless culture. Lunteren, Netherlands, ISOSC, pp 633–649
Tindall JA, Mills HA, Radcliffe DE (1990) The effect of root zone temperature on nutrient uptake of tomato. J Plant Nutr 13:939–956
Trang NTD, Brix H (2014) Use of planted biofilters in integrated recirculating aquaculture-hydroponics systems in the Mekong Delta, Vietnam. Aquac Res 45:460–469
Uchida R (2000) Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. In: Silva JA, Uchida R (eds) Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, pp 31–55
Van Os EA (1994) Closed growing systems for more efficient and environmental friendly produc- tion. Acta Hortic 361:194–200
Van Os EA (1999) Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. Water Sci Technol 39:105–112
Van Os EA (2009) Comparison of some chemical and non-chemical treatments to disinfect a recirculating nutrient solution. Acta Hortic 843:229–234
Van Os EA (2017) Recent advances in soilless culture in Europe. Acta Hortic 1176:1–8
Van Os EA, Gieling TH, Lieth JH (2008) Technical equipment in soilless production systems. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 157–207
Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use:

critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. New Phytol 157:423–447
Verdonck O, Penninck RD, De Boodt M (1983) The physical properties of different horticultural substrates. Acta Hortic 150:155–160
Verwer FLJA (1978) Research and results with horticultural crops grown in rockwool and nutrient film. Acta Hortic 82:141–148
Wallach J (2008) Physical characteristics of soilless media. In: Raviv, Lieth (eds) Soilless culture, theory and practice. Elsevier, Amsterdam, pp 41–116
Wang M, Zheng Q, Shen Q, Guo S (2013) The critical role of potassium in plant stress response. Int J Mol Sci 14:7370–7390
Wu M, Kubota C (2008) Effects of high electrical conductivity of nutrient solution and its application timing on lycopene, chlorophyll and sugar concentrations of hydroponic tomatoes during ripening. Sci Hortic 116:122–129
Zekki H, Gauthier L, Gosselin A (1996) Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J Am Soc Hortic Sci 121:1082–1088
Zoschke K, Börnick H, Worch E (2014) Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment–a review. Water Res 52:131–145

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

2 Parte

TECNOLOGÍA ESPECÍFICA PARA LA ACUAPONÍA

Capítulo 5

ACUAPONIA: LO BÁSICO

Wilson Lennard and Simon Goddek

Capítulo 5.
ACUAPONÍA: LO BÁSICO

Wilson Lennard and Simon Goddek*

Resumen
La acuaponia es una tecnología que forma parte de la disciplina más amplia de sistemas integrados de agricultura y acuicultura que busca combinar tecnologías de cultivo de animales y plantas para conferir ventajas y conservar nutrientes y otros recursos biológicos y económicos. Surgió en los Estados Unidos a principios de la década de 1970 y recientemente ha visto un resurgimiento, especialmente en Europa. Mientras que la acuaponia combina ampliamente el cultivo de peces recirculantes con la producción de plantas hidropónicas, la aplicación del término acuaponia es amplia y muchas tecnologías afirman el uso del nombre. La combinación del cultivo de peces con el cultivo de plantas terrestres y acuáticas a través de la acuaponia puede definirse mejor a través de sus credenciales de intercambio de recursos de nutrientes. La acuaponía aplica varios principios que incluyen, entre otros, el uso eficiente del agua, el uso eficiente de nutrientes, el impacto ambiental reducido o negado y la aplicación de enfoques biológicos y ecológicos para la producción de peces y plantas agrícolas. Las fuentes de agua son importantes para que los nutrientes necesarios en la producción de peces y plantas estén disponibles y equilibrados, debido a que la química del agua en el sistema es primordial para la producción optimizada de peces y plantas. Los sistemas pueden configurarse de varias maneras, incluidos los que están recirculando completamente y los que están desacoplados. La acuaponia busca aplicar métodos que brinden ventajas técnicas, biológicas, químicas, ambientales y económicas.

Palabras clave: Acuaponía; Agro acuicultura; Acuicultura; Hidroponía; Agricultura; Peces; Plantas; Nutrientes; Ecología

W. Lennard (*)
Aquaponic Solutions, Blackrock, VIC, Australia
e-mail: willennard@gmail.com
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
e-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5

5.1 INTRODUCCIÓN

La acuaponía es una tecnología que es un subconjunto de un enfoque agrícola más amplio conocido como sistemas integrados de acuicultura (IAAS) (Gooley y Gavine 2003). Esta disciplina consiste en integrar las prácticas de acuicultura de diversas formas y estilos (principalmente la cría de peces) con la producción agrícola basada en plantas. La justificación de los sistemas integrados de agro-acuicultura es aprovechar los recursos compartidos entre la acuicultura y la producción de plantas, como el agua y los nutrientes, para desarrollar y lograr prácticas de producción primaria económicamente viables y ambientalmente más sostenibles (Gooley y Gavine 2003). En esencia, los sistemas de producción de plantas terrestres y animales acuáticos comparten un recurso común: el agua. Las plantas generalmente consumen agua a través de la transpiración y la liberan al entorno gaseoso circundante, mientras que los peces generalmente consumen menos agua, pero su cultivo contenido produce importantes corrientes de aguas residuales debido a los desechos metabólicos acumulados. Por lo tanto, la acuicultura puede integrarse dentro de la vía de suministro de agua para la producción de plantas de manera no consuntiva, de modo que se puedan producir dos cultivos (peces y plantas) a partir de una fuente de agua que generalmente se usa para producir un cultivo (plantas). Una ventaja adicional e interesante de integrar la acuicultura con el riego. La vía de suministro para la producción de plantas se da por la acuicultura que también produce nutrientes a través de los desechos disueltos y no disueltos producidos a partir del metabolismo de los peces (y otros animales acuáticos). Por lo tanto, la acuicultura también puede producir corrientes de nutrientes de desecho que son adecuadas y ayudan a la producción de plantas al contribuir a los requerimientos de nutrientes de estas. Gooley y Gavine (2003) han resumido las ventajas producidas por la integración de la acuicultura con los sistemas convencionales de producción de plantas terrestres y acuáticas como:

1. Un aumento en la productividad y rentabilidad de la granja sin ningún aumento neto en el consumo de agua (Cap. 2).
2. La diversificación agrícola en cultivos de mayor valor, incluidas las especies acuáticas de alto valor.
3. Reutilización de recursos desperdiciados en la granja (por ejemplo, captura y reutilización de nutrientes y agua).
4. Reducción de los impactos ambientales netos de las prácticas agrícolas semi-intensivas e intensivas.
5. Beneficios económicos netos al compensar el capital agrícola existente y los gastos operativos (cap. 18).

Se ha dicho que la acuaponia ha evolucionado a partir de prácticas agrícolas relativamente antiguas asociadas con la integración del cultivo de peces con la producción de plantas, especialmente aquellas desarrolladas dentro del contexto de cultivo de arroz inundado del sudeste asiático y las prácticas agrícolas de Chinampa, isla flotante, Sudamérica (Komives y Junge 2015). En realidad, históricamente, los peces rara vez se añadían de forma activa en los arrozales hasta el siglo XIX (Halwart y Gupta 2004) y estaban presentes en densidades muy bajas que no contribuían a ninguna ayuda nutritiva sustancial para las plantas. Las chinampas se construyeron tradicionalmente en lagos en México, donde las ventajas de los nutrientes pueden haber sido suministradas a través de los sedimentos de los lagos eutróficos o semi-eutróficos, en lugar de hacerlo directamente desde cualquier sistema de producción de peces diseñado o activamente integrado (Morehart 2016; Baquedano 1993).

La acuaponía moderna comenzó en los EE.UU en la década de 1970 y fue evolucionada conjuntamente por varias instituciones interesadas en prácticas agrícolas más sostenibles. Los primeros importantes trabajos fueron realizados por varios investigadores, pero en última instancia, se cree que el progenitor de casi todos los sistemas de acuaponía modernos es el trabajo realizado por James Rakocy y su equipo de la Universidad de las Islas Vírgenes (UVI) a principios de la década de 1980 (Lennard 2017).

La acuaponía ahora se considera una industria nueva y emergente, con un lugar relevante en el contexto de la producción agrícola mundial y hay una serie de variaciones de la tecnología de integración de la piscicultura con el cultivo de plantas acuáticas que se definen colectivamente bajo la bandera o nombre de acuaponía (Knaus y Palm 2017). Por lo tanto, la acuaponía busca integrar la producción animal de la acuicultura con la producción de plantas hidropónicas utilizando varios métodos para compartir los recursos de agua y nutrientes entre los principales componentes de producción para producir productos pesqueros y vegetales comerciales y vendibles.

5.2 UNA DEFINICIÓN DE ACUAPONÍA

La acuaponía encaja en la definición más amplia de los sistemas integrados de acuicultura (IAAS). Sin embargo, el IAAS aplica muchas tecnologías diferentes de producción de plantas y animales acuáticos en muchos contextos, mientras que la acuaponía está mucho más asociada con la integración de tecnologías de cultivo de peces basadas en tanques (por ejemplo, sistemas de recirculación de acuicultura; RAS) con tecnologías de cultivo de plantas acuáticas o hidropónicas (Lennard 2017). Las tecnolo-

gías RAS aplican métodos conservados y estándar para el cultivo de peces en tanques con filtración aplicada para controlar y alterar la química del agua con el fin de hacerla adecuada para los peces (es decir, eliminación rápida y eficiente de los desechos sólidos de los peces, conversión eficiente, mediada por bacterias, del amoniaco de los desechos de los peces disueltos, potencialmente tóxicos, en nitrato, menos tóxico, y el mantenimiento del oxígeno mediante aireación asistida o inyección directa gas de oxígeno) (Timmons et al. 2002). Las tecnologías de cultivo hidropónico y de sustrato aplican métodos conservados y estándar para el cultivo de plantas terrestres comestibles dentro de ambientes acuáticos (es decir, las plantas acceden a los nutrientes necesarios para su crecimiento a través de un método de suministro basado en agua) (Resh 2013).

La asociación de la acuaponía con la acuicultura RAS estándar y el cultivo de hidroponía /sustrato hace que la acuaponía se defina a menudo simplemente como "... la combinación de la producción de peces (acuicultura) y la hidroponía de cultivo de plantas sin suelo bajo circulación de agua acoplada o desacoplada" (Knaus y Palm 2017). Esta definición amplia hace hincapié en la integración de hardware, equipo o tecnologías y pone poco énfasis, si es que lo hace, en cualquier otro aspecto del método.

Dado que la acuaponía es una tecnología a escala industrial relativamente nueva que aplica diferentes métodos y enfoques, la definición aplicada parece muy amplia. Algunos definen la acuaponía solo en un contexto de recirculación únicamente (Cerozi y Fitzsimmons 2017), otros se concentran en enfoques que no devuelven el agua de las plantas a los peces (Delaide et al. 2016) y otros incluyen tanto métodos de recirculación y desacoplamiento (Knaus y Palm 2017). Más aún, algunos investigadores incluyen el uso de efluentes de la acuicultura irrigados para la producción de cultivos en el suelo bajo el título de acuaponía (Palm et al. 2018). Históricamente, la acuaponía, como sugiere el desglose de la palabra (acuicultura e hidroponía), se definía como algo que solo concernía a la acuicultura y a la producción de plantas hidropónicas (Rakocy y Hargreaves 1993), por lo que los intentos actuales de asociación con el cultivo en suelo parecen incongruentes.

Aunque los sistemas acuapónicos integran tecnologías de acuicultura basadas en tanques con cultivo de plantas hidropónicas, los sistemas acuapónicos funcionan suministrando nutrientes a los habitantes de producción (peces y plantas) y repartiéndolos entre los habitantes que realizan servicios biológicos y químicos que ayudan al resultado de los habitantes de producción (microflora) (Fig. 5.1) (Lennard 2017). Por lo tanto, ¿es la Acuaponía un sistema más relacionado con el suministro, la

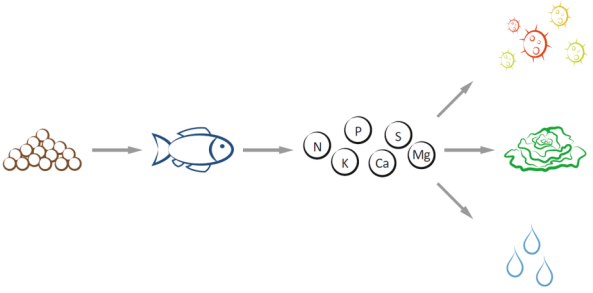


Fig. 5.1
Representación esquemática de los flujos de nutrientes dentro de un sistema acuapónico. El alimento para peces es el principal punto de entrada de nutrientes. Los peces comen el alimento, usan los nutrientes que necesitan, liberan el resto como desperdicio y este desperdicio se reparte entre los microbios, las plantas y el agua del sistema. (adaptado de Lennard 2017)

dinámica y la distribución de nutrientes que con la tecnología, el equipo o el hardware aplicado?

En las últimas décadas, la definición de acuaponía ha incluido un tema similar, con variaciones sutiles. La definición más amplia generalmente se ha proporcionado generalmente en las publicaciones científicas de Rakocy y su equipo de UVI, por ejemplo:

> *La acuaponía es el cultivo combinado de peces y plantas en sistemas de recirculación cerrados.*
> - Rakocy y col. (2004a, b)

Esta primera definición se basaba en el supuesto de que los sistemas de un solo bucle y de recirculación completa, que consistían en un componente de recirculación de acuicultura y un componente hidropónico, representaban todos los sistemas acuaponicos, lo que en ese momento era así. Graber y Junge (2009) ampliaron la definición, debido a los cambios y la evolución del enfoque, de la siguiente manera:

> *La acuaponía es una forma especial de sistemas de recirculación de acuicultura (RAS), es decir, un policultivo que consiste en tanques de peces (acuicultura) y plantas que se cultivan en el mismo círculo de agua (hidroponía).*
> - Graber y Junge (2009)

Los avances y métodos recientes exigen una reconsideración de este punto de vista. En los últimos años se ha producido un cambio en el enfoque de la acuaponía hacia un sistema de producción que aborde tanto la responsabilidad ecológica como la sostenibilidad económica. Kloas y col. (2015) y Suhl

et al. (2016) fueron de los primeros en abordar esta consideración económica:

> *[...] Se desarrolló un sistema acuapónico de recirculación doble único e innovador como requisito previo para una alta productividad comparable a las instalaciones profesionales de peces / plantas independientes.*
> – Suhl et al. (2016)

La cuestión de la definición, o aclaración de "lo que se puede definir como acuaponia", ha sido un punto de discusión en los últimos años. Una de las principales áreas de desarrollo ha sido el de los sistemas acuapónicos de múltiples bucles (o desacoplados) que tienen como objetivo proporcionar fertilizantes adicionales a las plantas para exponerlas a una concentración óptima de nutrientes (Goddek 2017). No debería existir oposición entre las ideologías de las metodologías acuapónicas de recirculación completa y de múltiples ciclos, ambas tienen sus respectivos lugares y aplicaciones dentro del contexto industrial apropiado y una sola fuerza impulsora común de ambas debería ser que la tecnología, a la vez que es eficiente en nutrientes y agua, también necesita ser económicamente competitiva para establecerse en el mercado. Para sustituir las prácticas convencionales, es necesario ofrecer a los clientes /usuarios potenciales algo más que una ideología, es decir, viabilidad técnica y económica.

El Centro Europeo de Acuaponía patrocinado por COST (COST FA1305 2017) aplica la definición *"... un sistema de producción de organismos acuáticos y plantas en el que la mayoría (> 50%) de nutrientes que sustentan el crecimiento óptimo de las plantas se derivan de los residuos procedentes de la alimentación de los organismos acuáticos"*, lo que pone claramente el énfasis en el aspecto de compartir nutrientes de la tecnología.

También hay que decir que la proporción de peces respecto a las plantas debe mantenerse en un nivel que apoye una perspectiva central de la acuaponía; que las plantas se cultiven utilizando los desechos de los peces. Un sistema que contiene un pez y varias hectáreas de cultivo hidropónico de plantas, por ejemplo, no debería considerarse acuapónico, simplemente porque ese pez efectivamente no aporta nada a los requerimientos de nutrientes de las plantas. Dado que el etiquetado de los productos de acuapónicos desempeña un papel cada vez más importante en la elección de los consumidores, queremos fomentar una discusión redefiniendo la acuaponía en función de estos múltiples desarrollos de la tecnología. Aunque abogamos por cerrar el ciclo de los nutrientes en el mayor grado posible en el contexto de los mejores medios practicables, una posible definición también debería tener en cuenta todos los avances. Por lo tanto,

la definición debe contener, como mínimo, el requisito de una mayoría de nutrientes derivados de la acuicultura para las plantas. Por lo tanto, una nueva definición puede representarse como:

> *La acuaponía **se** define como un **enfoque** integrado de producción de alimentos acuáticos multitróficos que comprende **al menos** un sistema de recirculación acuícola (RAS) y una unidad hidropónica conectada, por lo que el agua para el cultivo se comparte en alguna configuración entre las dos unidades.* ***No menos del 50% de los nutrientes suministrados a las plantas deben ser derivados de los desechos de los peces.***

Las definiciones basadas en nutrientes son abiertas y no juzgan la elección de la tecnología aplicada, o incluso las proporciones de cada componente (peces y plantas), siempre que se utilice la piscicultura y alguna forma de tecnología de producción de plantas acuáticas (cultivos hidropónicos o en sustrato) se utiliza Sin embargo, también enfoca la definición en los aspectos de la dinámica y el reparto de nutrientes de los métodos aplicados y, por lo tanto, garantiza, al menos en cierta medida, que las ventajas a menudo se asocian con la acuaponía (ahorro de agua, eficiencia de nutrientes, impacto ambiental reducido, sostenibilidad) están presentes en alguna proporción.

La definición de asociación de nutrientes aplicada a la acuaponía siempre será una fuente de mayor controversia entre quienes la practiquen. Esto se ve respaldado por el hecho de que el nombre acuaponía se aplica a una amplia gama de tecnologías diferentes con diferentes motivaciones de suministro de nutrientes y resultados de uso: desde y métodos de sistemas que esperan, si no exigen, que la gran mayoría de los nutrientes necesarios para cultivar las plantas provengan de los desechos de los pesces (en algunos casos, más del 90%; Lennard 2017) hasta diseños que comparten los suministros de nutrientes para las plantas entre desechos de los pesces y adiciones externas más sustanciales (por ejemplo, aproximadamente 50:50 de residuos de pesces a suplementos externos- como lo hacen muchos diseños modernos de sistemas acuapónios europeos desacoplados; COST FA1305 2017) a aquellos diseños que involucran tan pocos peces que no hay un suministro discernible de nutrientes de los desechos de los peces a las plantas (Lennard 2017).

El nombre de acuaponía, hasta hace relativamente poco tiempo (es decir, los últimos 3 a 5 años), se ha aplicado universalmente a diseños de sistemas acoplados y de recirculación completa que buscan suministrar la mayor cantidad posible de nutrientes para las plantas de los desechos de los peces

(Rakocy y Hargreaves 1993 ; Lennard 2017) (Fig. 5.2).
Sin embargo, los enfoques desacoplados ahora representan una proporción de los sistemas que se están investigando o aplicando comercialmente, especialmente en Europa, y en la práctica actual no suministrantan la cantidad de nutrientes requeridos por las plantas a partir de los desechos de los peces en la misma medida que los sistemas de recirculación total (Lennard 2017; Goddek y Keesman 2018). Por ejemplo, Goddek y Keesman (2018) afirman que para 3 ejemplos de diseños actuales de sistemas acuaponicos desacoplados europeos, los requisitos de adición relativa para nutrientes externos derivados del cultivo hidropónico son del 40-60% (NerBreen), 60% (Tilamur) y 38.1% (IGB Berlin). Debido a que estos diseños desacoplados se basan en la integración de las tecnologías de cultivo hidropónico / sustrato, se consideran de naturaleza acuaponica (Delaide et al.2016) (Fig. 5.3) (ver Capítulo 8).

En la actualidad, la definición de acuaponía se está ampliando más allá de los factores de eficiencia ecológica, del agua y de los nutrientes y la optimización para incluir también factores económicos (Goddek y Körner 2019; Goddek y Keesman 2018; Goddek 2017; Kloas et al. 2015; Reyes Lastiri y col. 2016; Yogev y col. 2016) (cap.8). Los beneficios de este enfoque son que un resultado económico positivo de la tecnología de acuaponia es tan importante como sus credenciales biológicas, químicas, de ingeniería, ecológicas y sostenibles y, por lo tanto, el resultado económico debe desempeñar un papel dentro de la definición general (Capítulo 8).

A menudo se asocian muchas ventajas con la acuaponía, especialmente en términos de su eficiencia en el uso del agua, su eficiencia en el uso de nutrientes, su naturaleza sostenible, su capacidad para producir dos cultivos a partir de una fuente de entrada (alimento para peces) y su menor

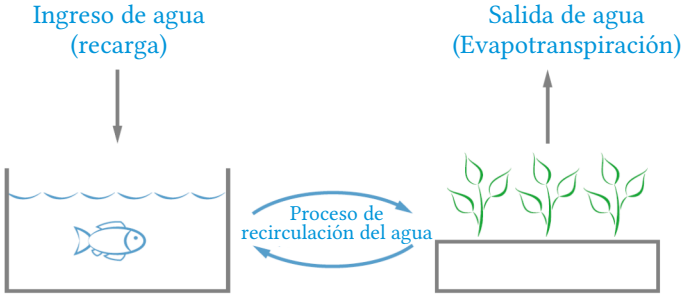


Fig. 5.2
Esquema simplificado de los principales flujos de agua dentro de un sistema acuapónico acoplado. Las concentraciones de nutrientes en el agua de proceso se distribuyen por igual en todo el sistema.

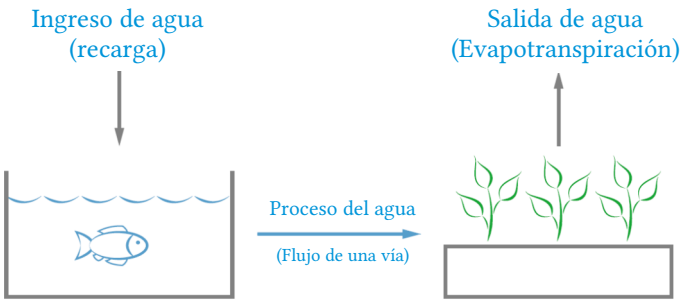


Fig. 5.2
Esquema simplificado de los principales flujos de agua dentro de un sistema acuapónico acoplado. Las concentraciones de nutrientes en el agua de proceso se distribuyen por igual en todo el sistema.

impacto ambiental (Timmons, et al., 2002; Buzby y Lian-shin 2014; Wongkiew et al. 2017; Roosta y Hamidpour 2011; Suhl y col. 2016) Estas ventajas son citadas y aplicadas regularmente por los operadores comerciales de acuaponía y se utilizan como una vía de comercialización y regulación de precios de los productos (peces y plantas), por lo tanto, el uso de la denominación "acuaponía" asocia directa e inmediatamente que los productos etiquetados como tales se han producido con métodos que contienen o utilizan las ventajas enumeradas. Sin embargo, no existe una regulación formal de la industria que dicte que el uso de la palabra (acuaponía) solo ocurre cuando las ventajas son aparentes y están presentes dentro de la tecnología y los métodos aplicados. Si las ventajas anteriores se asignan a la acuaponía como tecnología, entonces seguramente la tecnología debería proporcionar las ventajas prescritas, y si la tecnología no proporciona las ventajas, entonces la palabra no debe aplicarse (Lennard 2017).

Debido a que la acuaponía puede definirse en términos de su aspecto de integración de equipos de hardware (RAS con hidroponía), sus propiedades de distribución de nutrientes o su capacidad para proporcionar ventajas importantes, sigue existiendo un amplio espectro de posibles aplicaciones del nombre a diferentes enfoques técnicos que utilizan métodos distintos y exigen resultados diferentes. Por lo tanto, parece que la definición real de al acuaponía aún no se ha resuelto.
Por lo tanto, parece que aún no se han respondido preguntas muy importantes: ¿qué es la acuaponía y cómo se define?

Esto sugeriría que un aspecto muy importante que debe considerar la industria acuapónica es el desarrollo de una definición veraz y acordada.

La industria de la acuaponía en general seguirá estando llena de desacuerdos si no se acuerda una definición y, lo que es más importante, los consumidores de los productos producidos dentro de los sistemas acuapónicos estarán cada vez más confundidos acerca de lo que realmente es la acuaponía, una situación que no ayudará al crecimiento y la evolución de la industria.

5.3 Principios generales

A pesar de que la definición de acuaponía no se ha resuelto por completo, existen algunos principios generales que están asociados con la amplia gama de métodos y tecnologías de acuaponía.

El uso de los nutrientes añadidos al sistema acuapónico de la manera más óptima y eficiente posible para producir los dos productos principales de la empresa (es decir, peces y biomasa vegetal) es un primer principio importante y compartido asociado con la tecnología (Rakocy y Hargreaves 1993; Delaide et al. 2016; Knaus y Palm 2017). No tiene sentido agregar nutrientes (que poseen un costo inherente en términos de dinero, tiempo y valor) a un sistema para observar que un alto porcentaje de esos nutrientes se dividen en procesos, requisitos o resultados que no están directamente asociados con los peces y las plantas producidas, o cualquier forma de vida intermedia que pueda ayudar al acceso de nutrientes por los peces y las plantas (es decir, microorganismos - bacterias, hongos, etc.) (Lennard 2017). Por lo tanto, probablemente el principio general más importante asociado con la acuaponía es usar los nutrientes aplicados de la manera más eficiente posible para lograr una producción optimizada tanto de peces como de plantas.

Este mismo argumento también puede aplicarse al requerimiento de agua del sistema acuapónico en cuestión; Una vez más, el agua agregada al sistema debe ser utilizada principalmente por los peces y las plantas y debe usarse de la manera más eficiente posible y no debe permitirse que se filtre a los procesos, formas de vida o resultados que no estén directamente asociados con la producción de peces y plantas o que puedan afectar entorno circundante (Lennard 2017).

En términos reales, el uso eficiente de nutrientes y agua conduce a varios principios de diseño que se aplican ampliamente al método acuapónico:

1. El principio más importante de la acuaponía es utilizar los desechos producidos por los peces como fuente principal de nutrientes para las plantas. De hecho, esta es toda la idea de acuaponía y, por lo tanto,

debería ser un controlador de primer orden para el método. Históricamente, la acuaponía se concibió como un sistema para cultivar plantas utilizando desechos de acuicultura de peces para que esos desechos de la acuicultura tuvieran menos impacto ambiental y se vieran como un producto positivo y rentable, en lugar de un producto de desecho problemático con un costo asociado para cumplir con los requisitos legislativos ambientales (Rakocy y Hargreaves 1993; Love et al.2015a, b).

2. El diseño del sistema debe alentar el uso de tecnologías de cría de peces y cultivo de plantas que no absorban o utilicen de manera inherente los recursos de agua o nutrientes añadidos. Por ejemplo, se desaconsejan los componentes de mantenimiento de peces basados en el uso de estanques de tierra, porque el estanque de tierra tiene la capacidad de usar y hacer que el agua y los recursos de nutrientes no estén disponibles para los peces y plantas asociados, reduciendo así la eficiencia del uso de agua y nutrientes del sistema. Del mismo modo, los métodos de cultivo de plantas hidropónicas no deben usar medios que absorban cantidades excesivas de nutrientes o agua y que no estén disponibles para las plantas (Lennard 2017).
3. El diseño del sistema no debe desperdiciar nutrientes o agua a través de la producción de flujos de desechos externos. Principalmente, si el agua y los nutrientes abandonan el sistema a través de un flujo de desechos, entonces el agua y esos nutrientes no se están utilizando para la producción de peces o plantas, y por lo tanto, el agua y esos nutrientes se están desperdiciando, y el sistema no es tan eficiente como posible. Además, la producción de un flujo de residuos puede tener un impacto ambiental potencial. Si las aguas residuales y los nutrientes abandonan el sistema acuapónico, deben usarse en tecnologías alternativas de producción de plantas de exterior a sistema para que el agua y los nutrientes no se desperdicien, contribuyan a la producción general de biomasa comestible o vendible y no presenten una mayor potencial de impacto ambiental (Tyson et al. 2011).
4. El sistema debe estar diseñado para disminuir o idealmente, negar por completo, el impacto ambiental directo del agua o los nutrientes. Un objetivo de primer orden de la acuaponía es utilizar los desechos producidos por los peces como fuente de nutrientes para las plantas, a fin de negar la liberación de esos nutrientes directamente al ambiente circundante, donde pueden causar impactos (Tyson et al. 2011).
5. Los diseños de sistemas de acuaponía deberían prestarse idealmente para ubicarse dentro de estructuras y situaciones controladas ambientalmente (por ejemplo, invernaderos, salas de peces). Esto permite el potencial para lograr las mejores tasas productivas de peces y plantas del sistema. La mayoría de los diseños de acuaponía son relativamente

altos en términos de costos de capital y costos continuos de producción, y por lo tanto, la capacidad de alojar el sistema en el entorno perfecto mejora los potenciales de ganancias que justifican financieramente el alto capital y los costos de producción (Lennard 2017).

Los principios de diseño descritos anteriormente se asocian directamente con un conjunto de principios generales que a menudo, pero no siempre, se aplican al entorno de producción de la acuaponía. Estos principios generales se relacionan con el funcionamiento del sistema y con la distribución de nutrientes entre el sistema y sus habitantes.

La premisa básica de la acuaponía, en un contexto dinámico de nutrientes, es que los peces son alimentados con alimento balanceado, metabolizan y utilizan los nutrientes del alimento, liberando desechos basados en las sustancias del alimento para peces que no utilizan (incluidos los elementos), la microflora accede a esos desechos metabólicos de los peces y usa pequeñas cantidades de ellos, pero transforma el resto, y las plantas luego acceden y eliminan esos desechos metabólicos que han sido transformados por la microflora como fuentes de nutrientes y, en cierta medida, limpian el medio acuático de esos desechos y contrarrestar cualquier acumulación asociada (Rakocy y Hargreaves 1993; Love et al. 2015a, b).

Debido a que los sistemas de producción de peces basados en tierra eliminan nutrientes por sí mismos, la acuaponía generalmente utiliza lo que se conoce como principios del sistema de recirculación de la acuicultura (RAS) para el componente de producción de peces (Rakocy y Hargreaves 1993; Timmons et al. 2002). Los peces se mantienen en tanques hechos de materiales que no eliminan nutrientes del agua (plástico, fibra de vidrio, concreto, etc.), el agua se filtra para tratar o eliminar los productos de desecho metabólico de los peces (sólidos y gases de amoniaco disueltos) y el agua (y los nutrientes asociados) luego se dirige a un componente de cultivo de plantas mediante el cual las plantas usan los desechos de los peces como parte de su recurso de nutrientes (Timmons et al. 2002). En cuanto a los peces, los componentes de cultivo de plantas a base de tierra no se usan porque los suelos involucrados eliminan nutrientes y no necesariamente los ponen a disposición de las plantas. Además, las técnicas de cultivo de plantas hidropónicas no usan tierra y son más limpias que los sistemas basados en tierra y permiten un control pasivo de las mezclas de microorganismos presentes.

Las plantas cultivadas en hidroponía convencional requieren la adición de lo que se conoce como fertilizantes minerales: nutrientes que están presentes en sus formas iónicas basales (por ejemplo, nitrato, fosfato,

potasio, calcio, etc. como iones) (Resh 2013). Por el contrario, los sistemas de recirculación acuícola deben aplicar intercambios de agua regulares (diarios) para controlar la acumulación de metabolitos de desechos de pescado (Timmons et al. 2002). La acuaponía busca combinar las dos empresas separadas para producir un resultado que logre lo mejor de las dos tecnologías mientras niega lo peor (Goddek et al. 2015).

Las plantas necesitan un conjunto de macro y microelementos para un crecimiento óptimo y eficaz. crecimiento. En la acuaponía, la mayoría de estos nutrientes provienen de los desechos de los peces (Rakocy y Hargreaves 1993; Lennard 2017; COST FA1305 2017). Sin embargo, los (la principal fuente de nutrientes del sistema acuapónico) no contienen todos los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas y, por lo tanto, se requiere una nutrición externa, en mayor o menor medida, se requiere una nutrición externa.

El cultivo hidropónico y sustrato estándar agrega nutrientes al agua en formas que están directamente disponibles para la planta (es decir, formas iónicas e inorgánicas producidas mediante adiciones de variedades de sal diseñadas) (Resh 2013). Una proporción de los desechos liberados por los peces están en formas directamente disponibles para las plantas (por ejemplo, amonío) pero potencialmente tóxicos para los peces (Timmons et al. 2002). Estos metabolitos de desechos de peces iónicos disueltos, como el amonío, son transformados por especies bacterianas ubicuas que reemplazan los iones de hidrógeno con iones de oxígeno, siendo el producto del nitrato de amonio, que es mucho menos tóxico para los peces y es la fuente de nitrógeno preferida por las plantas (Lennard 2017) Otros nutrientes apropiados para la absorción de la planta se unen en la fracción sólida de los desechos de pescado como compuestos orgánicos y requieren un tratamiento adicional a través de la interacción microbiana para que los nutrientes estén disponibles para ser absorbidos por las plantas (Goddek et al. 2015). Por lo tanto, los sistemas acuapónicos requieren un conjunto de microfloras presentes para realizar estas transformaciones.

La clave para una integración hidropónica optimizada es determinar la relación entre peces producción de desechos (como directamente influido por la adición de alimento para peces) y la utilización de nutrientes de las plantas (Rakocy y Hargreaves 1993; Lennard y Leonard 2006; Goddek et al. 2015). Se han desarrollado varias reglas generales y modelos en un intento de definir este equilibrio. Rakocy y col. (2006) desarrollaron un enfoque que coincide con el requisito del área de cultivo de la planta con el aporte diario de alimento para peces y lo llamaron "La tasa de alimentación acuapónica". La relación de velocidad de alimentación se establece entre 60

y 100 gramos de alimento para peces por día, por metro cuadrado de área de cultivo de plantas (60–100 g/m² /día). Esta relación de tasa de alimentación se desarrolló utilizando *Tilapia* spp. peces que comen una dieta comercial estándar de 32% de proteína (Rakocy y Hargreaves 1993). Además, el sistema de acuapónico al que se refiere esta relación (conocido como el Sistema de acuaponía de la Universidad de las Islas Vírgenes - Sistema UVI) no utiliza la fracción de desechos sólidos de los peces, se sobreabastece con nitrógeno y requiere una desnitrificación pasiva en el sistema para controlar la tasa de acumulación de nitrógeno (Lennard 2017). Otros han determinado proporciones alternativas basadas en diferentes combinaciones de peces y plantas, probadas en diferentes condiciones específicas (por ejemplo, Endut et al.2010 - 15–42 g/m² /día para peces gato africano, *Clarias gariepinus* y plantas de espinaca de agua, *Ipomoea aquatica*).

La relación de tasa de alimentación UVI fue desarrollada por Rakocy y su equipo como un enfoque aproximado; de ahí que se indique como un rango (Rakocy y Hargreaves 1993). La relación UVI trata de tener en cuenta el hecho de que diferentes plantas requieren diferentes cantidades de nutrientes y mezclas y, por lo tanto, un enfoque de diseño acuapónico "genérico" es una perspectiva difícil. Lennard (2017) ha desarrollado un enfoque alternativo que busca hacer coincidir directamente las tasas de producción de nutrientes de desechos de peces (en base al alimento de los peces utilizado y la conversión y utilización de ese alimento) con las tasas específicas de absorción de nutrientes de la planta para realizar y aplicar una proporción exacta entre los peces y las plantas para cualquier especie de peces o plantas elegida y que esta puede realizarse y contabilizarse en el diseño del sistema acuapónico. Este enfoque de diseño se combina con un enfoque de manejo específico que también utiliza todos los nutrientes disponibles dentro de la fracción de desechos sólidos de los peces (a través de la remineralización aeróbica de los desechos sólidos de pescado) y solo agrega los nutrientes requeridos por las especies de plantas elegidas para el cultivo que faltan en las fracciones de producción de residuos de los peces. Por lo tanto, esto reduce sustancialmente la proporción de la tasa de alimentación asociada (p. Ej., Menos de 11 g/m² /día para algunas variedades de hojas verdes como equivalente de UVI) y permite que cualquier especie de pez se adapte de manera específica y exacta a cualquier especie de planta elegida (Lennard 2017). Del mismo modo, Goddek et al. (2016) han propuesto modelos que permiten una determinación más precisa de la relación de componentes de peces a plantas para sistemas acuapónicos desacoplados.

Los principios generales del uso eficiente de nutrientes, el uso bajo y

eficiente del agua, el impacto ambiental bajo o negado, la capacidad de ubicarse lejos de los recursos tradicionales del suelo y la sostenibilidad del uso de los recursos son los principios generales aplicados al diseño y configuración de los sistemas acuapónicos y su aplicación continua debe ser alentado dentro del campo y la industria.

5.4 Recurso Agua

El agua es el medio clave utilizado en los sistemas acuapónicos porque se comparte entre los dos componentes principales del sistema (peces y componentes de la planta), es el principal portador de los recursos de nutrientes dentro del sistema y establece el entorno químico general de los peces y las plantas que se cultivan dentro. Por lo tanto, es un ingrediente vital que puede tener una influencia sustancial sobre el sistema.

En un sistema acuapónico, el contexto del medio ambiente basado en el agua, la fuente de agua y lo que esa fuente de agua contiene química, física y biológicamente son una influencia importante sobre el sistema porque establece una línea de base para lo que se requiere ser agregado al sistema por las diversas entradas del sistema. Estas entradas, a su vez, afectan y establecen el entorno en el que se cultivan los peces y las plantas. Por ejemplo, algunos de los principales insumos en términos de nutrientes para cualquier sistema acuapónico incluyen, entre otros, el alimento para peces (un recurso de nutrientes primario para el sistema), los tampones aplicados (que ayudan a controlar y establecer los valores de pH asociado con los componentes de peces y plantas) y cualquier adición de nutrientes externos o suplementos necesarios para satisfacer las necesidades de nutrientes de los peces y las plantas (Lennard 2017).

Los alimentos para peces están diseñados para proporcionar la nutrición necesaria para el crecimiento y la salud de los peces y, por lo tanto, contienen mezclas y cantidades de nutrientes principalmente para ayudar al cultivo de los peces (Timmons et al. 2002; Rakocy et al. 2006). Las plantas, por otro lado, tienen diferentes requisitos de nutrientes que el de los peces, ya que estos rara vez, si es que alguna vez, cumplen con los requisitos totales de nutrientes de las plantas (Rakocy et al. 2006). Debido a esto, los sistemas acuaponicos que cultivan peces y plantas utilizando únicamente recursos nutritivos derivados de alimentos pueden producir de manera eficiente y óptima los peces, pero rara vez lo hacen para las plantas. Los mejores diseños de sistemas de acuaponia reconocen que el resultado final es producir peces y plantas a tasas de crecimiento óptimas y eficientes y, por lo tanto, también reconocen que se requiere alguna forma de nutrición adicional para cumplir con el requerimiento total de nutrientes de las

plantas (Rakocy et al. 2006; Suhl et al.2016).

Los sistemas de acuaponía clásicos y totalmente recirculantes generalmente dependen de alimentos para peces (después de que los peces han consumido ese alimento, lo metabolizaron y utilizaron los nutrientes que contiene) como la principal fuente de nutrientes para las plantas y complementan los nutrientes faltantes requeridos por las plantas a través de alguna forma de régimen de amortiguación (Rakocy et al. 2006) o a través de suplementos nutricionales adicionales (por ejemplo, agregando formas de nutrientes quelatados directamente al agua de cultivo o agregando nutrientes a través de aerosoles foliares) (Roosta y Hamidpour 2011).

El mejor ejemplo de este enfoque acuaponico recirculante clásico es el sistema acuaponico UVI (Universidad de las Islas Vírgenes) desarrollado por el Dr. James Rakocy y su equipo de UVI (Rakocy y Hargreaves 1993; Rakocy et al. 2006). El diseño de UVI agrega principalmente nutrientes para el cultivo de peces y plantas a través de adiciones de alimento para peces. Sin embargo, los alimentos para peces no contienen suficiente calcio (Ca +) y potasio (K +) para un cultivo óptimo de las plantas. La conversión mediada por bacterias de amonio disuelto en desechos de peces a nitrato causa la producción de iones de hidrógeno en todo el sistema dentro de la columna de agua, y la proliferación de estos iones de hidrógeno resulta en una caída constante del pH del agua del sistema hacia un estado ácido. El régimen de amortiguación empleado agrega el calcio y el potasio faltantes agregando sales básicas (a menudo sales basadas en iones de carbonato, bicarbonato o hidroxilo emparejados con calcio o potasio) al sistema que ayudan a controlar el pH del agua del sistema a un nivel que cumple con los requisitos ambientales de pH compartido por los peces y las plantas, al tiempo que proporcionan el calcio y el potasio adicionales que requieren las plantas (Rakocy et al. 2006). Además, el sistema UVI agrega otro nutriente importante para el crecimiento de las plantas que no está disponible en alimentos estándar para peces, hierro (Fe), a través de adiciones regulares y controladas de quelato de hierro. Por lo tanto, el potasio, el calcio y el hierro que requieren las plantas que no se encuentran en el alimento para peces están disponibles a través de estos dos mecanismos adicionales de suministro de nutrientes (Rakocy et al. 2006).

Los diseños de acuaponía desacoplada adoptan un enfoque para cultivar los peces y las plantas de manera que el agua sea utilizada por los peces y los nutrientes de desecho de los peces se suministren a las plantas, sin recirculación del agua de regreso a los peces (Karimanzira et al. 2016). Los diseños desacoplados, por lo tanto, permiten una mayor flexibilidad en la personalización de la química del agua, después de que esta sea usada por

los peces, para una producción optimizada de la planta porque la suplementación de los nutrientes que no están presentes en la alimentación de los peces (y los desechos de los peces) puede lograrse sin preocupaciones de que el agua regrese a estos (Goddek et al.2016). Esto significa que los diseños desacoplados potencialmente pueden aplicar mezclas de nutrientes y concentraciones más exigentes al agua de cultivo, después del uso de los peces, para el cultivo de plantas, y esto se puede lograr con una suplementación de nutrientes más exigente e intensa.

En ambos casos (diseños de sistemas de acuaponía recirculados y desacoplados), es esencial una comprensión de la calidad química del agua de origen para que se puedan lograr concentraciones de nutrientes tan cercanas a las óptimas para las plantas. Si, por ejemplo, la fuente de agua contiene calcio (un caso a menudo visto cuando se utilizan los recursos de agua subterránea), esto afectará y cambiará el régimen de amortiguación aplicado a los diseños de acuaponía recirculante y la extensión de la suplementación de nutrientes aplicada a un diseño desacoplado porque el calcio presente en la fuente de agua compensará cualquier suplemento requerido para las necesidades de calcio de la planta (Lennard 2017). O, si el agua de origen contiene concentraciones elevadas de sodio (Na^+) (nuevamente, a menudo visto con recursos de agua subterránea y un nutriente que las plantas no usan y que pueden acumularse en las aguas del sistema), es importante saber cuánto hay presente, por lo que los métodos de manejo pueden aplicarse para evitar la toxicidad potencial de nutrientes para plantas (Rakocy et al. 2006). La naturaleza química de la fuente de agua, por lo tanto, es vital para la salud y el manejo general del sistema de acuaponía.

En última instancia, debido a que la química de la fuente de agua puede afectar el manejo de nutrientes del sistema acuapónico y porque a los operadores de acuaponía les gusta tener la capacidad de manipular el agua y la química de nutrientes en un alto grado, una fuente de agua con poca, si alguna, química de agua asociada es altamente deseable (Lennard 2017) En este sentido, El agua de lluvia o el agua tratada para la eliminación de productos químicos (por ejemplo, ósmosis inversa) es la mejor fuente de agua para la acuaponía en un contexto de química del agua (Rakocy et al.2004a, b; Lennard 2017). Las aguas subterráneas también son adecuadas, pero debe asegurarse de que no contengan productos químicos o sales en concentraciones que sean demasiado altas para ser prácticas (por ejemplo, altas concentraciones de magnesio o hierro) o que contengan especies químicas que no sean utilizadas por los peces o las plantas (por ejemplo, altas concentraciones de sodio) (Lennard 2017). Las aguas de los ríos también pueden ser adecuadas como fuente de agua para un sistema acuapónico, pero como para otras fuentes de agua, deben ser probados

para presencia química y concentraciones. Las fuentes de agua de la ciudad (es decir, el agua reticulada y suministrada para fines domésticos y de consumo) se aplican ampliamente en acuaponía (Love et al.2015a, b) y también son aceptables si contienen concentraciones aceptables de nutrientes, sal o sustancias químicas. En el caso de los recursos hídricos suministrados por la ciudad o el municipio, debe tenerse en cuenta que muchos suministros tienen alguna forma de esterilización aplicada para hacer que el agua sea potable para los humanos. Si esta fuente de agua se va a utilizar para acuaponia, entonces es importante asegurarse de que los productos químicos que puedan aplicarse para lograr la esterilización (por ejemplo, cloro, cloramina, etc.) no estén presentes en concentraciones que puedan dañar los peces, las plantas o microorganismos dentro del sistema acuapónico (Lennard 2017).

La química asociada con la fuente de agua no es el único factor que debe tenerse en cuenta al suministrar el agua de origen para uso en acuaponia. Muchas aguas naturales también pueden contener microbios y otros microorganismos que pueden afectar la salud ecológica general del sistema acuaponico o presentar un riesgo discernible para la salud humana. Las aguas pluviales rara vez contienen microbios; sin embargo, los recipientes o tanques en los que se puede almacenar el agua de lluvia pueden contener o permitir la proliferación microbiana. Las aguas subterráneas generalmente son buenas en términos de presencia microbiana, pero también pueden contener altas cargas microbianas, especialmente si provienen de áreas asociadas con la cría de animales o el tratamiento de desechos humanos. Las aguas de los ríos también pueden contener altas cargas microbianas debido a los flujos de tratamiento de desechos humanos o agrícolas y nuevamente deben verificarse mediante un análisis microbiano detallado (Lennard 2017).

Debido a que la naturaleza química y microbiana de la fuente de agua utilizada en los sistemas de acuaponia puede tener efectos potenciales en la química y microbiología del agua del sistema, se recomienda esterilizar y tratar cualquier fuente de agua aplicada para la eliminación de sustancias químicas (por ejemplo, ósmosis inversa, destilación, etc.) antes de ser utilizado en un sistema de acuaponia (Lennard 2017). Si la esterilización se aplica universalmente, la posibilidad de introducir microbios extraños y no deseados en el sistema se reduce sustancialmente. Si se aplica el tratamiento y la filtración de agua, se eliminarán los productos químicos, sales, nutrientes no deseados, pesticidas, herbicidas, etc. y, por lo tanto, no pueden contribuir negativamente al sistema.

Una fuente de agua limpia, libre de microbios, sales, nutrientes y otros

productos químicos permite al operador acuapónico manipular el agua del sistema para contener la mezcla de nutrientes y la fuerza que requieren sin temor a que las influencias externas puedan afectar el funcionamiento del sistema o la salud. y la fuerza de los peces y las plantas y es un requisito vital para cualquier operación comercial de acuaponía.

5.5 REQUERIMIENTOS DE CALIDAD DE AGUA

La acuaponía representa un esfuerzo por controlar la calidad del agua para que todas las formas de vida actuales (peces, plantas y microbios) se cultiven en las condiciones de química del agua lo más cercanas posibles (Goddek et al. 2015). Si la química del agua puede ajustarse a los requisitos de estos tres conjuntos de formas de vida importantes, se puede aspirar a la eficiencia y la optimización del crecimiento y la salud de todos (Lennard 2017).

La optimización es importante para la producción comercial de acuaponía porque es solo a través de la optimización que se puede lograr el éxito comercial (es decir, la rentabilidad financiera). Por lo tanto, la química del agua y los requisitos de calidad del agua dentro del sistema acuapónico son fundamentales para el éxito comercial y económico final de la empresa (Goddek et al. 2015). Actualmente existe un desacuerdo dentro de la industria y la comunidad de acuaponía en general en términos de lo que representa una calidad de agua buena o aceptable dentro de los sistemas acuapónicos. Parece que está universalmente aceptado que los requisitos de la química del agua natural de los subconjuntos de formas de vida individuales (peces, plantas y microbios) son ampliamente aceptados (Rakocy y Hargreaves 1993; Rakocy et al. 2006; Goddek et al. 2015; Delaide et al.2016; Lennard 2017). Sin embargo, la presencia de una amplia gama de enfoques, métodos y opciones tecnológicas que se denominan acuaponía y los antecedentes o la historia de las tecnologías independientes asociadas de los sistemas de recirculación de la acuicultura (RAS) y el cultivo de plantas hidropónicas (incluida la cultura del sustrato) parece conducir a desacuerdos entre operadores, científicos y diseñadores. Por ejemplo, teniendo en cuenta un solo parámetro químico del agua, el pH, algunos sostienen que los requisitos de pH de las plantas cultivadas hidropónicamente son muy diferentes a los requisitos de pH de las especies de peces de agua dulce cultivadas con RAS (Suhl et al. 2016) La industria hidropónica generalmente aplica valores de pH entre 4.5 y 6.0 para el cultivo de plantas a base de agua (Resh 2013), mientras que la industria RAS generalmente aplica valores de pH entre 7.0 y 8.0 (Timmons et al. 2002) para cumplir con los requisitos de los peces y los microbios presentes (que realizan transformaciones importantes de metabolitos de desechos de los peces potencial-

mente tóxicos en formas menos tóxicas). El argumento, por lo tanto, es que cualquier punto de ajuste de pH es un compromiso entre los requisitos de las plantas, los peces y los microbios y que, por lo tanto, no se puede lograr un pH óptimo para todas las formas de vida, lo que conduce a una producción de plantas subóptima (Suhl et al. 2016) Otros argumentan, sin embargo, que un escrutinio más detallado de las complejidades de la dinámica de la absorción de nutrientes por parte de las plantas puede dilucidar una opinión diferente (Lennard 2017). Los sistemas hidropónicos (y de cultivo de sustrato) suministran nutrientes a las plantas en sus formas iónicas basales al agregar sales de nutrientes al agua que se disocian para liberar los iones de nutrientes disponibles (Resh 2013). La investigación ha demostrado que estas formas de nutrientes iónicos existen en una ventana de disponibilidad para la planta, en función del pH del agua del sistema disponible. Por lo tanto, en un contexto hidropónico estándar, sin presencia de flora microbiana (es decir, esterilizada, como lo están la mayoría de los sistemas hidropónicos), es importante ajustar el pH del agua del sistema a un nivel que haga que la mezcla de nutrientes iónicos que la planta requiera esté lo más disponible (Resh 2013). Dentro de cualquier sistema hidropónico, este es un compromiso en sí mismo, porque como lo demuestra cualquier gráfico de disponibilidad de nutrientes iónicos (ver Fig. 5.4), las diferentes formas de nutrientes iónicos son las más disponibles a diferentes pH (Resh 2013). Es esta asociación estándar de disponibilidad de nutrientes iónicos la que la industria hidropónica usa como cebador para los puntos de ajuste de pH y explica por qué el pH operativo hidropónico deseado se sitúa entre 4.5 y 6.0 (un ambiente ácido) en los sistemas de cultivo hidropónico y sustrato esterilizados. Alternativamente, RAS aplica un punto de ajuste del pH del agua basado en lo que es natural para los peces que se cultivan y los microbios que tratan y convierten los productos de los desechos de peces.

(Timmons et al. 2002; Goddek et al. 2015; Suhl et al. 2016). En ambientes naturales de agua dulce, la mayoría de las especies de peces requieren un pH ambiental (es decir, pH del agua) que coincida estrechamente con el pH interno del pez, que a menudo está cerca de un pH de 7,4 (Lennard 2017). Además, los principales microbios asociados con la transformación de metabolitos disueltos en el cultivo RAS (las bacterias de nitrificación de varias especies) también requieren un pH de alrededor de 7.5 para la transformación óptima de amonío a nitrato (Goddek et al. 2015; Suhl y col. 2016). Por lo tanto, los operadores de RAS aplican un punto de ajuste de pH de aproximadamente 7,5 al cultivo de peces de agua dulce RAS. Hay una diferencia obvia entre un pH de 5,5 (un promedio para el cultivo de plantas hidropónico esterilizado estándar) y un pH de 7,5 (un estándar promedio para el cultivo de peces RAS). Por lo tanto, se argumenta ampliamente que

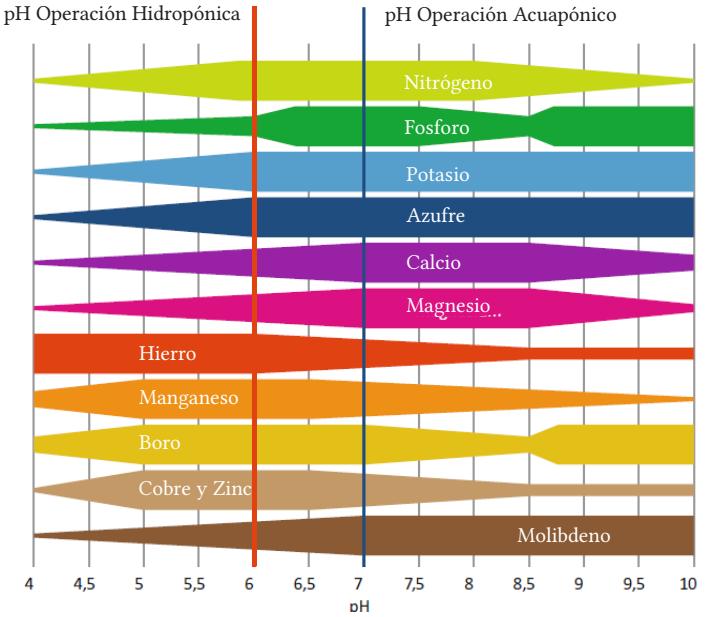


Fig. 5.4
Ejemplo de una tabla de disponibilidad de nutrientes mediada por el pH estándar para plantas de cultivo acuático. La línea roja representa un pH operativo normal para un sistema hidropónico; la línea azul para un sistema acuapónico.

el pH representa uno de los mayores compromisos de calidad del agua presentes en la ciencia acuapónica (Goddek et al. 2015; Suhl et al. 2016). Los defensores de los diseños acuapónicos desacoplados a menudo citan esta diferencia en el requisito de pH óptimo como argumento para el enfoque del diseño desacoplado, afirmando que los diseños totalmente recirculantes deben encontrar un compromiso de pH cuando los diseños desacoplados tienen el lujo de aplicar diferentes puntos de ajuste del pH del agua a los componentes de peces y plantas (Suhl et al. 2016; Goddek et al. 2016). Sin embargo, lo que este argumento ignora es que los sistemas acuaponicos, a diferencia de los sistemas hidropónicos, no son estériles y emplean técnicas acuáticas ecológicas que alientan a una población diversa de microflora a estar presente dentro del sistema acuapónico (Eck 2017; Lennard 2017). Esto da como resultado una amplia variedad de microbios presentes, muchos de los cuales forman asociaciones complejas entre ellos y con las plantas, especialmente con sus raíces, dentro del sistema acuapónico (Lennard 2017). Es bien sabido y establecido en la fisiología de las plantas que muchos microbios, asociados con el medio y la matriz del suelo, se asocian estrechamente con las raíces y que muchos de estos microbios ayudan a las plantas a acceder y absorber nutrientes vitales

(Vimal et al. 2017). También se sabe que algunos de estos microbios producen moléculas orgánicas que ayudan directamente al crecimiento, al desarrollo de la inmunidad y ayudan a superar a los patógenos de las plantas (especialmente la raíz) (Vimal et al. 2017; Srivastava y col. 2017) En esencia, estos microbios ayudan a las plantas de muchas maneras que simplemente no están presentes en el ambiente esterilizado aplicado en el cultivo hidropónico estándar. Con estos diversos microbios presentes, las plantas obtienen acceso a nutrientes de muchas maneras que no son posibles en sistemas que dependen únicamente de la configuración del pH acuático para permitir el acceso a nutrientes de las plantas (por ejemplo, cultivo hidropónico estándar y cultivo de sustrato). Muchos de estos microbios operan a niveles de pH amplios, al igual que otros microbios basados en el suelo, como las bacterias de nitrificación (pH de 6,5–8,0, Timmons et al. 2002). Por lo tanto, con estos microbios presentes en los sistemas acuaponicos, el punto de ajuste del pH puede elevarse por encima de lo que normalmente se aplica en técnicas de cultivo hidropónico o de sustrato (es decir, pH de 4,5–6,0) mientras que el crecimiento de plantas avanzado y eficiente todavía está presente (Lennard 2017). Esto se evidencia en el trabajo de varios investigadores en acuaponía que han demostrado mejores tasas de crecimiento de plantas en acuaponía que en hidroponía estándar (Nichols y Lennard 2010).

Otros requisitos de calidad del agua en los sistemas acuapónicos están relacionados con los parámetros físico-químicos y, más específicamente, con los parámetros de requerimientos de nutrientes para plantas. En términos de requisitos físico-químicos, las plantas, los peces y los microbios comparten muchos puntos en común. El oxígeno disuelto (OD) es vital para los peces, las raíces de las plantas y la microflora y debe mantenerse en los sistemas acuapónicos (Rakocy y Hargreaves 1993; Rakocy et al. 2006). Las raíces de las plantas y la microflora generalmente requieren concentraciones de OD relativamente más bajas que la mayoría de los peces; Las raíces de las plantas y los microbios pueden sobrevivir con OD por debajo de 3 mg/L (Goto et al. 1996), mientras que la mayoría de los peces requieren más de 5 mg/L (Timmons et al. 2002). Por lo tanto, si la concentración de OD dentro del sistema acuapónico se establece y se mantiene para el requisito de peces, también se cumple el requisito de plantas y microbios (Lennard 2017). Las diferentes especies de peces requieren diferentes concentraciones de OD: los peces de aguas tropicales (por ejemplo, *Tilapia* spp., Barramundi) generalmente pueden tolerar concentraciones de OD más bajas que las especies de peces de agua fría (por ejemplo, salmónidos como la trucha arcoiris y el carbón ártico); Debido a que el requisito de OD de los peces es casi siempre mayor que el requisito de raíces de plantas y el requisito de microflora, el OD debe establecerse para las especies de peces

específicas que se cultivan (Lennard 2017).

Las concentraciones de dióxido de carbono en el agua (CO_2), como las del OD, generalmente son establecidas por los peces porque las raíces de las plantas y los microbios pueden tolerar concentraciones más altas. Las concentraciones de dióxido de carbono son importantes para la salud y el crecimiento óptimos de los peces y a menudo se ignoran en los diseños acuapónicos. Los parámetros y los puntos de ajuste para las concentraciones de CO_2 deben ser los mismos que para las mismas especies de peces cultivadas a solas, en sistemas RAS y, en general, deben mantenerse por debajo de 20 mg/L (Masser et al. 1992).

La temperatura del agua es importante para todas las formas de vida actuales dentro de un sistema acuapónico. Las especies de peces y plantas deben coincidir lo más posible para los requisitos de temperatura del agua (por ejemplo, peces *Tilapia* spp. Como 25 ℃ más, y las plantas como la albahaca prosperan en esta temperatura relativamente alta del agua; variedades de lechuga con agua más fría, y por lo tanto, un mejor candidato de pez emparejado es la trucha arcoiris) (Lennard 2017). Sin embargo, al igual que para otros parámetros físicos y químicos del agua, cumplir con los requisitos de temperatura de agua de los peces es primordial porque los microbios tienen la capacidad de someterse a una selección específica de especies en función de las condiciones ambientales (por ejemplo, la diferenciación de especies bacterianas de nitrificación ocurre a diferentes temperaturas del agua y las especies que mejor se adapten a la temperatura particular del agua dominarán la biomasa bacteriana del sistema de nitrificación) y muchas plantas pueden crecer muy bien en un rango más amplio de temperaturas del agua (Lennard 2017). Hacer coincidir la temperatura del agua y mantenerla dentro de más o menos 2 °C (es decir, un control de temperatura de alto nivel) con la de los peces, es un requisito importante en acuaponía porque cuando la temperatura del agua es correcta y no se desvía del promedio ideal, los peces logran un metabolismo eficiente y optimizado para comer y convertir el alimento de una manera más eficiente, lo que lleva a mejores tasas de crecimiento de peces y liberaciones de carga de desechos estables y predecibles, lo que a su vez ayuda al cultivo de plantas (Timmons et al. 2002).

Mantener la claridad del agua (baja turbidez) es otro parámetro importante en el cultivo acuapónico (Rakocy et al. 2006). La mayor parte de la turbidez del agua se debe a las cargas de sólidos suspendidos que no se han filtrado adecuadamente, y estos sólidos pueden afectar los peces al adherirse a sus branquias, lo que puede reducir las tasas potenciales de transferencia de oxígeno y las tasas de liberación de amonío (Timmons et al. 2002). Se

recomiendan cargas de sólidos suspendidos de menos de 30 mg/L para peces de cultivo acuapónico (Masser et al. 1992; Timmons et al. 2002). Las altas cargas de sólidos suspendidos también afectan las raíces de las plantas porque tienen la capacidad de adherirse a las raíces, lo que puede causar ineficiencia en la absorción de nutrientes, pero más comúnmente proporciona un mayor potencial para la colonización de organismos patógenos, lo que conduce a una mala salud de las raíces y la muerte final de la planta (Rakocy et al. 2006). Estos sólidos en suspensión también fomentan la prevalencia de bacterias heterotróficas (especies que descomponen y metabolizan el carbono orgánico) que, si se les permite dominar los sistemas, pueden competir con otras especies requeridas, como las bacterias de nitrificación.

La conductividad eléctrica (CE) es una medida que a menudo se aplica en hidroponía para comprender la cantidad de nutrientes totales presentes en el agua. Sin embargo, no puede proporcionar información sobre la mezcla de nutrientes, la presencia o ausencia de especies de nutrientes individuales o la cantidad de especies de nutrientes individuales presentes (Resh 2013). No se aplica a menudo en acuaponia porque solo mide la presencia de formas de nutrientes iónicos (cargados), y se ha argumentado que la acuaponía es un método de suministro de nutrientes orgánicos y, por lo tanto, la CE no es una medida relevante (Hallam 2017) Sin embargo, las plantas generalmente solo obtienen formas iónicas de nutrientes y, por lo tanto, La CE puede usarse como una herramienta general o guía para la cantidad total de nutrientes disponibles para las plantas en un sistema acuaponico (Lennard 2017).

Para los sistemas de acuaponía de recirculación completa, en términos de parámetros físico-químicos, son los peces los más exigentes en sus requisitos y, por lo tanto, si los sistemas se manejan para mantener los requisitos de los peces, las plantas y los microbios tienen sus requisitos más que satisfechos (Lennard 2017). Sin embargo, la diferencia en lo que respecta a las plantas es su requerimiento de que la mezcla correcta y la fuerza de los nutrientes estén presentes para permitir el acceso y la absorción de nutrientes optimizados (ya sea de forma independiente o asistida por microbios), lo que conduce a un crecimiento eficiente y rápido. Los sistemas de acuaponía desacoplados pueden, por lo tanto, ser más atractivos debido a la percepción de que permiten un suministro de nutrientes más exigente a las plantas (Goddek et al. 2016). El alimento para peces y, por lo tanto, los desechos de pescado no contienen la mezcla correcta de nutrientes para cumplir con los requisitos de la planta (Rakocy et al. 2006). Por este motivo, el diseño del sistema acuapónico debe tener en cuenta los nutrientes faltantes y complementarlos. Los sistemas de acuaponía de

recirculación completa generalmente complementan los nutrientes al agregarlos a las especies de sal utilizadas para administrar el régimen de amortiguación del pH diario; la porción básica de la sal ajusta el pH y la porción positiva de la sal permite la suplementación de los nutrientes vegetales faltantes (por ejemplo, potasio, calcio, magnesio) (Rakocy et al. 2006). Los diseños de acuaponía desacoplada toman el agua residual y los desechos sólidos asociados del componente de pescado y ajustan el agua para contener los nutrientes necesarios para la producción de plantas al agregar nutrientes en diferentes formas (Goddek et al. 2016). Estas adiciones de nutrientes generalmente se basan en el uso de especies de sales hidropónicas estándar que no aportan necesariamente ningún resultado de ajuste de pH (por ejemplo, fosfato de calcio, sulfato de calcio, fosfato de potasio, etc.).

La vía para el crecimiento eficiente de las plantas en los sistemas de acuaponía es proporcionar un perfil de nutrientes acuáticos que proporcione todos los nutrientes que la planta requiere (mezcla) en las concentraciones requeridas (concentración) (Lennard 2017). En los diseños de acuaponía totalmente recirculantes, o en los diseños de acuaponía desacoplados que no aplican métodos de esterilización, parece haber menos requisitos para cumplir con las concentraciones o concentraciones de nutrientes aplicadas en la hidroponía estándar, porque la naturaleza ecológica del sistema asocia muchas micro floras diversas con las raíces de las plantas y estas micro floras ayudan al acceso a los nutrientes de las plantas (Lennard 2017). Para los diseños de acuaponía desacoplados u otros que aplican esterilización al componente de la planta y siguen un enfoque análogo hidropónico estándar, parece ser necesario tratar de acercarse a las concentraciones de nutrientes hidropónicos estándar (Suhl et al.2016; Karimanzira et al.2016) . El compromiso, sin embargo, con el enfoque desacoplado es que conduce a proporciones de suplementación externa mucho más allá que los diseños recirculantes de acuaponía; Los diseños desacoplados europeos actualmente promedian 50% o más de adiciones externas de nutrientes (COST FA1305 2017; Goddek y Keesman 2018), mientras que el método UVI proporciona menos del 20% y otros sistemas pueden suministrar menos del 10% de suplementos externos de nutrientes (Lennard 2017).

Independientemente del método, todos los sistemas acuaponicos deben esforzarse por proporcionar a las plantas la nutrición necesaria para un crecimiento optimizado a fin de proporcionar a la empresa la mayor posibilidad de viabilidad financiera. En este contexto, el contenido de nutrientes y la fuerza del agua que se entrega a las plantas es muy importante y regular. Las pruebas de nutrientes del agua deben emplearse para

que la mezcla y la resistencia de los nutrientes puedan mantenerse y gestionarse como un requisito muy importante para la calidad del agua.

5.6 TECNOLOGÍAS DE CULTIVO DE PECES APLICABLES

En acuaponia, la porción de acuicultura de la ecuación de integración se aplica ampliamente en un contexto basado en tanques, donde los peces se mantienen en tanques, el agua se filtra a través de mecanismos mecánicos (eliminación de sólidos) y biológicos (transformación de amonío en nitrato) y oxígeno disuelto se mantiene, ya sea mediante aireación o inyección directa de oxígeno (Rakocy et al. 2006; Lennard 2017).

Como se ha argumentado en la sección 5.0 (Introducción) de este capítulo, los ejemplos históricos de chinampas (Somerville et al. 2014) y el cultivo de arroz asiático (Halwart y Gupta 2004) son ejemplos de como las primeras interacciones de la acuaponía son infundados e inapropiados de los principios acuapónicos, debido a que la acuaponía moderna se basa en el diseño de adiciones de peces y alimento para peces que proporcionan un nivel de nutrición diseñado para las plantas y, por lo tanto, estos ejemplos históricos no pueden considerarse de ninguna manera similares (Lennard 2017).

Los ejemplos históricos anteriores, que se basan en sistemas de cultivo de plantas basados en el suelo, conducen a la pregunta de qué tecnologías de acuicultura son adecuadas para la integración acuapónica. La acuicultura de peces de estanque de agua dulce extensiva basada en el suelo es el método de cultivo más grande aplicado para producir peces de agua dulce para consumo humano (Boyd y Tucker 2012). Un enfoque de estanque se basa en la base de tierra del estanque, y la microflora asociada presente en ese suelo, para tratar y remediar los desechos producidos por el cultivo de peces para que los peces no vivan en aguas que tengan el potencial de ser tóxicas para ellos (Boyd y Tucker 2012). Debido a que este sistema se basa en la capacidad de tratamiento inherente del estanque de tierra, las densidades de peces son relativamente bajas en comparación con otros métodos de acuicultura. Dado a que las densidades de peces son bajas (y, por lo tanto, las tasas de alimentación asociadas son bajas) y el propio estanque trata y absorbe los residuos de nutrientes de desecho producidos por los peces, las aguas del estanque presentan concentraciones extremadamente bajas de nutrientes en el agua. Estas concentraciones de nutrientes acuáticos del sistema de estanques son tan bajas que a menudo son inapropiadas como fuentes de nutrientes para métodos de producción de plantas acuáticas comerciales sustanciales (Lennard 2017). Por lo tanto, los estanques no son un método de acuicultura apropiado para integrarse con

la hidroponía en términos de tasas de producción de plantas aceptables.

Del mismo modo, los métodos de cultivo de peces de pista (como se aplican regularmente para la producción de salmónidos de agua dulce), que suministran volúmenes muy grandes de agua a altas tasas de rotación, o tiempos de residencia bajos, a través de tanques de cultivo de peces de pista controlados, no son apropiados para la integración acuapónica porque las tasas de renovación del agua no permiten una acumulación adecuada de nutrientes para cumplir con los requisitos de nutrientes para las plantas (Rakocy y Hargreaves 1993).

Las tecnologías de cultivo de peces más apropiadas para aplicar dentro de un contexto de integración acuapónica son aquellas que cultivan peces en tanques y permiten un nivel de acumulación de desechos de pescado (acumulación de nutrientes de plantas) que tiene el potencial de conducir a concentraciones de nutrientes en el agua que son aplicables para la producción eficiente de plantas hidropónicas (Rakocy et al. 2006). Los principios del Sistema de Recirculación de Acuicultura (RAS) se aplican ampliamente a la acuaponía porque proporcionan las metodologías para mantener y criar con éxito los peces, en volúmenes controlados de agua, con bajas tasas diarias de reemplazo de agua, que permiten la acumulación de desechos de pescado (nutrientes vegetales) que se acercan a los requeridos para cultivar las plantas hidropónicamente de manera eficiente (Rakocy y Hargreaves 1993; Lennard 2017). Las complejidades y los requisitos de diseño de RAS se analizan en el capítulo 3 de este libro. Basta con decir que el cultivo de peces RAS es el único método realmente apropiado para aplicar los componentes de cultivo de peces en un contexto acuapónico y, como se discutió anteriormente, los sistemas de acuicultura basados en el suelo, como los sistemas de estanques extensivos y los sistemas de cultivo de canales, no pueden proporcionar los requisitos de nutrientes de las plantas y, por tanto, no deben considerarse.

5.7 FUENTES DE NUTRIENTES

El principal aporte a cualquier sistema acuapónico son los nutrientes agregados porque los sistemas acuapónicos están diseñados para repartir de manera eficiente los nutrientes agregados a las tres formas importantes de vida presentes: los peces y las plantas (que son los principales productos del sistema) y la microflora (que ayudan a que los nutrientes agregados estén disponibles para los peces y las plantas) (Lennard 2017).

En los diseños acuaponicos clásicos de recirculación completa, uno de los factores claves del diseño es utilizar la fuente principal de entrada de

nutrientes, el alimento para peces, de la manera más eficiente posible y, por lo tanto, los diseños de recirculación completa se esfuerzan por suministrar la mayor cantidad de nutrientes necesarios para las plantas a partir del alimento para peces (Lennard 2017). Los diseños desacoplados, por otro lado, ponen énfasis en el crecimiento optimizado de las plantas al comparar directamente las mezclas de nutrientes y potencias aplicadas en el cultivo hidropónico estándar y en el cultivo en sustrato y tratar de replicarlos dentro del contexto acuapónico y, por lo tanto, no se esfuerzan por suministrar la mayor cantidad de nutrientes necesarios para las plantas a partir de la alimentación de los peces y utilizan complementos de nutrientes externos sustanciales para lograr las tasas de crecimiento de plantas (Delaide et al. 2016). Esto significa que se pone un énfasis diferente en el origen de los nutrientes agregados, en función del enfoque de diseño técnico, y esto por lo tanto, afecta la fuente principal de suministro de nutrientes del sistema acuapónico; para diseños de recirculación completa, la fuente principal de nutrientes para plantas es el alimento para peces (a través de la producción de desechos de peces), y para diseños desacoplados, la fuente principal de suministro de nutrientes para las plantas son los suplementos externos (por ejemplo, sales nutritivas) (Lennard 2017).

Los diseños de acuapónicos totalmente recirculantes, como el modelo del sistema de acuaponía UVI, se basan en la alimentación de peces como la principal fuente de nutrientes para el sistema (Rakocy et al. 2006). El alimento para peces se agrega a los peces, que lo comen, lo metabolizan y utilizan los nutrientes y producen un flujo de residuos (tanto sólidos como disueltos). Esta flujo de desechos de los peces se convierte en la principal fuente de nutrientes para las plantas y, por lo tanto, el alimento para peces es la principal fuente de nutrientes para las plantas. El sistema UVI proporciona aproximadamente el 80% o más de los nutrientes necesarios para cultivar las plantas solo con el alimento para peces (Lennard 2017). Los nutrientes restantes necesarios para el crecimiento de las plantas, debido a que el alimento para peces no los contiene en las cantidades requeridas, se agregan a través de un método de suplementación de nutrientes que proporciona la doble función de suplementar los nutrientes adicionales y controlar el pH acuático del sistema (Rakocy et al. 2006). Este enfoque de doble función se denomina "amortiguación" y el suplemento se denomina "buffer". Para el modelo UVI, los dos nutrientes vegetales importantes identificados como carentes en el alimento para peces y que requieren suplementación son el potasio (K) y el calcio (Ca) y se suplementan diariamente a través del régimen de amortiguación. Además, el hierro (Fe) requerido por la planta también carece en el alimento para peces y se complementa en forma de quelato mediante la adición directa al agua del sistema a una frecuencia medida en semanas (es decir, cada 2 a 4 semanas

según un análisis semanal de hierro acuático)(Rakocy et al. 2006).

Otros enfoques o métodos de diseño acuapónico totalmente recirculantes ponen un énfasis aún mayor en proporcionar nutrientes a través del alimento para peces. Lennard (2017) ha desarrollado un método para sistemas de recirculación completa que suministra más del 90% de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas a partir del alimento para peces agregado. El aumento en la eficiencia de los nutrientes suministrados a través de la alimentación de peces de este método en comparación con el método UVI es que este enfoque remineraliza los desechos de peces sólidos (a través de una biodigestión externa mediada por bacterias) y agrega estos nutrientes nuevamente al sistema acuapónico para que estos sean usados por la planta, mientras que el método UVI envía la mayoría de los desechos de pescado sólido a un flujo de desechos externo (Rakocy et al. 2006; Lennard 2017). Este enfoque también agrega nutrientes deficientes en el alimento para peces para el crecimiento de las plantas a través de un régimen de amortiguación; Sin embargo, este régimen es mucho más exigente y permite una mayor manipulación de las concentraciones y mezclas de nutrientes que el enfoque UVI (Lennard 2017).

Por lo tanto, las principales rutas de adición de nutrientes para la mayoría de los diseños de sistemas acuapónicos de recirculación completa son la alimentación de los peces (ruta principal), la suplementación externa de tampón para añadir potasio y calcio (ruta menor) y la suplementación directa de quelato de hierro (ruta menor). Los diseños de sistemas acuapónicos desacoplados, como los que se están adoptando actualmente en Europa, se basan en una mezcla de nutrientes de la alimentación para peces y de una suplementación activa y externa para proporcionar los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas (Suhl et al. 2016) Debido a que los diseños desacoplados no devuelven agua del componente de la planta para el componente de los peces, es posible personalizar el perfil de nutrientes dentro del agua específicamente para el requerimiento de las plantas (Goddek et al. 2016). Por lo tanto, los diseños de acuaponía desacoplada casi siempre dependen de una suplementación sustancial de nutrientes externos para cumplir con los requisitos de la planta y ponen mucho menos énfasis en proporcionar la mayor nutrición posible a las plantas a partir de los desechos de los peces. Además, la cantidad de suplementación externa es sustancial en comparación con los enfoques de recirculación completa (Lennard 2017), con fracciones externas que representan regularmente del 50% o más del requerimiento total de nutrientes de las plantas o más (Goddek 2017). Los nutrientes externos suplementados a los sistemas acuaponicos desacoplados son con mayor frecuencia nutrientes hidropónicos análogos o derivados de la sal (Delaide et al. 2016;

Karimanzira et al. 2016). Esta dependencia de una fuente de nutrientes adicionales importantes, distintos de los que surgen de los desechos de los peces (alimentos para peces) que son de naturaleza salina hidropónica, para el suministro de plantas del enfoque europeo desacoplado, incluso ha afectado directamente a la definición de acuaponia que la comunidad europea de acuaponia actualmente aplica, con la COST de la EU Aquaponics Hub, definiendo la acuaponía como "... un sistema de producción de organismos acuáticos y plantas donde la mayoría (> 50%) de los nutrientes que sustentan las plantas se derivan de desechos originados por la alimentación de los organismos acuáticos" (Goddek 2017; COST FA 1305, 2017) en comparación con Lennard (2017) que define la acuaponia como la que obtiene al menos un 80% de suministro de nutrientes de los desechos de los peces. Algunos también discuten si un método que se basa en el 50% de los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas que se originan de fuentes externas que no sean alimentos para peces es en realidad de naturaleza acuapónica o más bien, ¿un método hidropónico con algunos peces integrados o agregados? (Lennard 2017).

Otra fuente de suministro de nutrientes propuesta para los sistemas acuapónicos es la de la suplementación externa de nutrientes mediante la aplicación de aerosoles de plantas foliares (Tyson et al. 2008; Roosta y Hamidpour 2011; Roosta y Hamidpour 2013; Roosta 2014). Estos aerosoles foliares son nuevamente una entrega acuática de sales o derivados de nutrientes hidropónicos estándar. La diferencia es que en los ejemplos desacoplados anteriores, las sales de nutrientes se agregan directamente al agua de cultivo y, por lo tanto, las plantas acceden a ellas a través de la absorción de la raíz (Resh 2013), mientras que los aerosoles foliares, como su nombre lo indica, agregan sales de nutrientes disueltas a las hojas y la absorción de la planta se logran a través del acceso estomático o cuticular de la hoja de la planta (Fernández et al. 2013).

Por lo tanto, existen varias fuentes importantes de nutrientes aplicadas en acuaponía: alimentos para peces, sistemas de amortiguación (a través de especies de sales básicas que ajustan el pH; agregadas a la columna de agua), adiciones de sales nutritivas (sales de nutrientes hidropónicas agregadas a la columna de agua) y aerosoles foliares (sales nutritivas hidropónicas añadidas a la superficie de la hoja). Todos estos nutrientes se suministran al sistema acuapónico para la salud y el crecimiento de los peces y plantas que se cultivan.

5.8 LA ACUAPONÍA COMO UN ENFOQUE ECOLÓGICO

La acuaponía, hasta hace poco, ha estado dominada por enfoques de diseño

totalmente recirculantes (o acoplados) que comparten y recirculan constantemente el recurso hídrico entre los dos componentes principales (cultivo de peces y plantas) (Rakocy et al. 2006; Lennard 2017) Además, los enfoques de tecnología baja a media aplicados históricamente a la acuaponía han impulsado el deseo de eliminar componentes costosos para aumentar el potencial de un resultado económico positivo. Uno de los componentes de filtración que casi siempre se aplica a las tecnologías estándar de cultivo en RAS e hidroponía /sustrato, es el de la esterilización acuática.

La esterilización en un contexto de cultivo RAS e hidropónico/sustrato se aplica universalmente porque las altas densidades de los peces o las plantas cultivadas generalmente atraen la presencia de organismos patógenos acuáticos que reducen sustancialmente las tasas de producción en general (Van Os 1999; Timmons et al. 2002). La razón principal de este aumento de la presencia de plagas acuáticas en ambas tecnologías es que cada una se concentra en proporcionar recursos biológicos y ecológicos mínimos y, por lo tanto, permite un considerable "espacio ecológico" dentro del sistema de agua para la colonización biótica. En estas condiciones biológicas "abiertas", las plagas y las especies patógenas proliferan y tienden a colonizar rápidamente para aprovechar las especies presentes (es decir, peces y plantas) (Lennard 2017). En este contexto, la esterilización o desinfección del agua de cultivo se ha visto históricamente como un enfoque de ingeniería para contrarrestar el problema (Van Os 1999; Timmons et al. 2002). Esto significa que tanto las industrias de RAS como las de cultivo hidropónico/sustrato adoptan un enfoque de esterilización para controlar los organismos patógenos dentro del agua de cultivo asociada.

La acuaponía siempre ha puesto énfasis en la importancia de la microbiología asociada para realizar servicios biológicos importantes. En todos los diseños acuapónicos acoplados de Rakocy y su equipo de UVI, no se incluyó un filtro biológico porque demostraron que en el cultivo en balsa, el componente hidropónico proporcionó un área de superficie más que suficiente para soportar el tamaño de la colonia de bacterias nitrificantes para tratar todo el amonio producido por los peces como un producto de desecho disuelto y convertirlo en nitrato (Rakocy et al. 2006, 2011). Por lo tanto, Rakocy y su equipo no abogaron por aplicar la esterilización del agua en el sistema porque podría haber afectado las colonias bacterianas nitrificantes. Esta perspectiva histórica de UVI / Rakocy dictó el diseño del sistema acuapónico en el futuro. Se identificaron y discutieron otras ventajas de no incluir la esterilización acuática en los sistemas de acuaponia, especialmente en el contexto de la microbiota de plantas de asistencia

(Savidov 2005; Goddek et al. 2016).

El pensamiento actual en la investigación y la industria de la acuaponia es que el no aplicar ninguna forma de esterilización o desinfección acuática permite que el agua del sistema desarrolle una ecología acuática compleja que consta de muchas formas diferentes de vida microbiológicas (Goddek et al.2016; Lennard 2017). Esto produce una situación similar a un ecosistema natural en el que una gran diversidad de microflora interactúa entre sí y con las otras formas de vida asociadas dentro del sistema (es decir, peces y plantas). El resultado propuesto es que esta diversidad conduce a una situación en la que ningún organismo patógeno único puede dominar debido a la presencia de toda la demás microfloras y, por lo tanto, no puede causar efectos devastadores en la producción de peces o plantas. Se ha demostrado que los sistemas acuapónicos contienen una gran diversidad de microflora (Eck 2017) y, a través del mecanismo de diversidad ecológica propuesto anteriormente, promueven la asistencia a la salud y crecimiento de los peces y de plantas (Lennard 2017).

El enfoque no esterilizado y ecológicamente diverso se ha aplicado históricamente a diseños acuapónicos acoplados o totalmente recirculantes (Rakocy et al. 2006), mientras que se ha propuesto una analogía hidropónica esterilizada para algunos enfoques de diseño acuapónico desacoplado (Monsees et al. 2016; Priva 2009; Goddek 2017). Sin embargo, parece que más diseñadores desacoplados están aplicando principios que adoptan un enfoque ecológico no esterilizado (Goddek et al. 2016; Suhl et al. 2016; Karimanzira et al. 2016) y, por tanto, reconocen que hay un efecto positivo asociado a una microflora acuapónica diversa (Goddek et al. 2016; Lennard 2017).

5.9 VENTAJAS DE LA ACUAPONÍA

Debido a que existen dos tecnologías análogas separadas que producen peces y plantas a altas velocidades (cultivo de peces RAS y producción de plantas en cultivo hidropónico/sustrato), parece pertinente una razón para su integración. El RAS produce peces a tasas productivas en términos de ganancia de biomasa individual, por el peso del alimento agregado, que rivaliza, si no es que es mejor, con otros métodos de acuicultura (Lennard 2017). Además, las altas densidades de peces que RAS permite conducen a mayores ganancias colectivas de biomasa (Rakocy et al.2006; Lennard 2017). Los cultivos hidropónicos y de sustrato poseen, dentro de un contexto de ambiente controlado, tasas de producción avanzadas de plantas que mejoran la mayoría de los otros métodos de agricultura y horticultura (Resh 2013). Por lo tanto, inicialmente, existe un requisito

para que la acuaponía produzca peces y plantas a tasas que igualen estas dos tecnologías productivas separadas; de lo contrario, cualquier pérdida de esfuerzo productivo cuenta contra cualquier argumento de integración. Si la tasa productiva de los peces y las plantas en un sistema acuapónico puede igualar, o mejorar a las industrias RAS e hidropónicas, entonces se puede argumentar a favor de otras ventajas que pueden ocurrir debido al proceso de integración.

El cultivo hidropónico estándar o sustrato se ha comparado directamente con la acuaponía en términos de tasas de crecimiento en las dos tecnologías. Lennard (2005) comparó la producción de lechuga del sistema acuapónico con un control hidropónico en varios experimentos de laboratorio replicados. Él demostró que la producción de lechuga acuapónica fue estadísticamente inferior en acuaponía (4,10 kg/m²) en comparación con la hidroponía (6,52 kg/m²) cuando se aplicaba un enfoque estándar de diseño y manejo del sistema acuapónico de lecho de medios. Sin embargo, luego realizó una serie de experimentos que aislaron parámetros específicos del diseño (p. Ej., Suministro recíproco vs constante de agua de la subunidad hidropónica, tasa de flujo de agua aplicada a la subunidad hidropónica y compararon diferentes subunidades hidropónicas) o compararon controladores de gestión específicos (por ejemplo, amortiguación metodologías y especies y las concentraciones iniciales de nutrientes iniciales) para lograr la optimización y luego demostraron que la acuaponia (5,77 kg/m²) era estadísticamente idéntica a la producción de lechuga hidropónica (5,46 kg/m²) después de la optimización del sistema acuapónico en función de las mejoras sugeridas según sus experimentos anteriores, el resultado sugiere que las mejoras en los diseños de acuapónicos acoplados o recirculantes pueden igualar las tasas de producción de plantas hidropónicas estándar. Lennard (2005) también demostró una supervivencia de peces, SGR, FCR y tasas de crecimiento iguales a las exhibidas en el RAS estándar y la acuicultura extensiva en estanques para las especies de peces analizadas (Bacalao Murray australiano).

Pantanella y col. (2010) también demostraron tasas de producción de lechuga estadísticamente similares a la producción de lechuga dentro de sistemas acuapónicos de alta densidad de peces (5,7 kg/m² de producción de lechuga) y de baja densidad de peces (5,6 kg/m² de producción de lechuga) en comparación con un control hidropónico estándar (6,0 kg/m²).

Lennard (Nichols y Lennard 2010) demostró resultados estadísticamente iguales o mejores para todas las variedades de lechuga y casi toda la producción de variedades de hierbas probadas en un sistema acuapónico con técnica de película nutritiva (NFT) en comparación con un sistema

hidropónico NFT dentro del mismo invernadero.

Delaide y Col. (2016) compararon el agua de producción de los RAS complementada con nutrientes (se añadieron nutrientes para igualar una mezcla de nutrientes del agua y la fuerza del ejemplo Rakocy- denotado como un análogo acuapónico), agua de producción de RAS totalmente complementada con nutrientes (agua de producción de RAS con sales nutritivas hidropónicas añadidas para cumplir con una mezcla de nutrientes del agua y una fuerza tal como se usa para la hidroponía estándar, denotada como un análogo desacoplado) y un control hidropónico (solución de nutritiva hidropónica estándar) en términos de tasa de crecimiento de las plantas y demostró que el análogo de agua acuapóníca igualó al control hidropónico y el agua análoga desacoplada superó el control hidropónico. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no se trataba de sistemas acuapónicos completamente operativos que contenían peces (y el contenido microbiano asociado, completo y activo) que se compararon, sino simplemente agua extraída de un RAS en funcionamiento y complementada, luego comparada con un agua de control hidropónico.

Rakocy y su equipo de UVI han demostrado con varios estudios de *Tilapia* spp. que las tasas de crecimiento de los peces son iguales a los estándares de la industria establecidos por las prácticas habituales de producción acuícola (Rakocy y Hargreaves 1993; Rakocy et al. 2004a, b, 2006, 2011).

Estos y otros estudios han demostrado que la acuaponía, sin importar la configuración (acoplada y desacoplada), tienen el potencial de producir tasas de producción de plantas iguales o mejores que las tasas de producción hidropónica estándar y de peces de un nivel similar al de los RAS. Por lo tanto, el requisito discutido anteriormente de que la acuaponía para igualar sus análogos en la industria (RAS e hidroponía) parece haber sido probada adecuadamente, y por lo tanto, las otras ventajas de la acuaponía deben considerarse.

El uso eficiente del agua se atribuye regularmente a la acuaponía. Lennard (2005) afirmó que el ahorro de agua asociado con un sistema optimizado de prueba de acuaponía (laboratorio) fue 90% o mayor en comparación con un sistema de control de acuicultura RAS estándar donde el agua se intercambió para controlar las acumulaciones de nitrato, mientras que las plantas en acuaponía realizaron el mismo requisito. Por lo tanto, demostró que la acuaponía proporciona un beneficio sustancial de ahorro de agua en comparación con la acuicultura RAS estándar. Curiosamente, esta cifra de ahorro de agua del 90% se ha indicado posteriormente en general dentro de la comunidad mundial de acuaponía en un contexto de uso de plantas (por

ejemplo, la acuaponía utiliza 90% menos de agua que la producción de plantas a base de suelo (Graber y Junge 2009)) - un ejemplo de cómo los argumentos no científicos pueden ser adoptados incorrectamente por participantes no científicos de la industria.

McMurtry (1990) demostró una tasa de consumo de agua en su sistema acuapónico de aproximadamente el 1% de la requerida en un sistema de cultivo de estanque similar. Rakocy (1989) ha demostrado tasas similares de consumo de agua del 1% en comparación con la acuicultura en estanques. Rakocy y Hargreaves (1993) declararon que la tasa diaria de reemplazo de agua para el sistema acuapónico UVI era aproximadamente el 1.5% del volumen total del sistema y Love et al. (2015a, b) establecieron una tasa aproximada de pérdida de agua del 1% del volumen del sistema por día para su sistema de investigación acuapónico.

La comparación de la acuaponía con el RAS puede lograr ahorros sustanciales de agua ya que la acuaponía usa pequeñas cantidades de agua de reemplazo diariamente. Un sistema acuapónico bien diseñado buscará usar el agua de la manera más eficiente posible y, por lo tanto, solo reemplazará el agua perdida por la evapotranspiración de las plantas (Lennard 2017). De hecho, se ha propuesto que el agua incluso puede recuperarse de esa pérdida debido a la evapotranspiración de la planta mediante el empleo de alguna forma de esquema o tecnología de recolección de contenido de agua en el aire (Kalantari et al.2017). Los sistemas acuapónicos acoplados parecen proporcionar un mayor potencial para conservar y reducir el uso del agua (Lennard 2017). Si la dinámica de los nutrientes entre la producción de peces y el uso de las plantas puede equilibrarse, la única pérdida de agua es a través de la evapotranspiración de las plantas, debido a que el agua se comparte integralmente entre los componentes de los peces y las plantas, los volúmenes diarios de agua de reposición simplemente representan toda el agua perdida de las plantas del sistema (Lennard 2017). Los diseños de acuaponía desacoplados presentan una propuesta más difícil porque los dos componentes no están unidos integralmente y el uso diario de agua del componente de los peces no coincide con el uso diario de agua del componente de las plantas (Goddek et al.2016; Goddek y Keesman 2018). Por lo tanto, el uso del agua y las tasas de reposición para los sistemas acuapónicos no están completamente resueltos y probablemente nunca lo estarán debido a las grandes diferencias en los enfoques de diseño del sistema.

El uso eficiente de nutrientes se asigna al método acuapónico y se cita como una ventaja del enfoque de la acuaponía (Rakocy et al. 2006; Blidariu y Grozea 2011; Suhl y col. 2016; Goddek y col. 2015). Esto se debe general-

mente a que la acuicultura RAS estándar utiliza los nutrientes del alimento para peces para su crecimiento, y el resto se desecha. Los peces metabolizan gran parte del alimento que reciben, pero solo utilizan aproximadamente del 25 al 35% de los nutrientes añadidos (Timmons et al. 2002; Lennard 2017). Esto significa que hasta el 75% de los nutrientes agregados al RAS solo para peces se desperdician y no se utilizan. La acuaponía busca usar los nutrientes desperdiciados en los RAS para la producción de plantas, y por lo tanto, se dice que la acuaponía usa los nutrientes agregados de manera más eficiente porque dos cultivos se producen a partir de una fuente de entrada (Rakocy y Hargreaves 1993; Timmons et al. 2002; Rakocy et al. al.2006; Lennard 2017). El grado de uso de nutrientes de los desechos de los peces difiere entre los diversos métodos acuapónicos. El modelo UVI totalmente recirculante no utiliza la mayoría de los desechos sólidos generados por los peces mediante el alimento suministrado y los envía a la basura (Rakocy et al. 2006), el modelo de recirculación total de Lennard lleva esto un paso más allá al usar todos los desechos generados por el alimento de los peces (desechos disueltos directamente y sólidos mediante remineralización microbiana externa con reemplazo del sistema principal) (Lennard 2017). Muchos enfoques desacoplados también intentan utilizar todos los desechos generados por el alimento de los peces, a través del uso directo de desechos disueltos y nuevamente, a través de la remineralización microbiana externa con reemplazo del sistema principal (Goddek et al.2016; Goddek y Keesman 2018). Todos estos métodos y enfoques demuestran que uno de los principales impulsores del diseño acuapónico es utilizar la mayor cantidad posible de nutrientes agregados y, por lo tanto, intentar utilizarlos lo más eficientemente posible.

La independencia del suelo ha sido citada como una ventaja del diseño acuapónico (Blidariu y Grozea 2011; Love et al. 2015a, b). La ventaja percibida es que debido a que no se requiere suelo, el sistema o instalación acuapónica puede estar ubicado donde el operador lo elija, en lugar de donde esté presente un suelo adecuado (Love et al. 2015a, b). Por lo tanto, el método de acuaponía es independiente de la ubicación en función de la disponibilidad del suelo, lo cual es una ventaja sobre la agricultura basada en el suelo.

Se ha argumentado que la acuaponía proporciona una ventaja al imitar los sistemas naturales (Blidariu y Grozea 2011; Love et al. 2014). Esto está respaldado por la naturaleza ecológica del enfoque/método acuapónico, como se describe en la sección. 5.7 anterior, con las ventajas asociadas relacionadas con comunidades microflorales diversas y densas (Lennard 2017).

La acuicultura tiene un impacto ambiental directo potencial debido a la liberación de aguas residuales ricas en nutrientes al medio ambiente circundante, en general, los ambientes acuáticos (Boyd y Tucker 2012). Algunos métodos hidropónicos también pueden poseer este potencial. Sin embargo, la acuaponía puede exhibir un impacto ambiental directo reducido o negado de las corrientes de desechos ricas en nutrientes porque el componente principal generador de desechos (es decir, los peces) están integrados con un componente de uso de nutrientes (es decir, las plantas) (Rakocy et al. 2006; Blidariu y Grozea 2011; Goddek et al.2015; Lennard 2017). Sin embargo, algunos métodos de acuaponí producen desechos (por ejemplo, el modelo UVI); pero estos generalmente son tratados y reutilizados para otras prácticas agrícolas en el sitio de la instalación acuapónica (Timmons et al. 2002; Rakocy et al. 2006). Muchos métodos acuapónicos se basan en el uso de alimentos estándar para la acuicultura, que contienen concentraciones variables de sodio, generalmente mediante el uso de harina de pescado o aceite de pescado como ingrediente (Timmons et al. 2002). Las plantas no utilizan el sodio y, por lo tanto, puede acumularse con el tiempo en los sistemas acuapónicos, lo que puede requerir un tipo de reemplazo de agua para que el sodio no se acumule en concentraciones que afecten a las plantas (Lennard 2017). Sin embargo, se ha informado que algunas especies de lechuga tienen la capacidad de absorber sodio cuando estaban expuestas al agua de la acuicultura (Goddek y Vermeulen 2018).

Los sistemas acuapónicos acoplados o recirculados comparten el recurso hídrico entre los dos componentes principales (peces y plantas). Debido a esta naturaleza acuática totalmente conectada y recirculante, los sistemas acuapónicos acoplados exhiben un mecanismo de autocontrol en términos de incapacidad para aplicar de forma segura herbicidas y pesticidas a las plantas; Si se aplican, su presencia puede afectar negativamente a los peces (Blidariu y Grozea 2011). Los defensores de la recirculación total ven esta incapacidad para aplicar pesticidas y herbicidas como una ventaja, el argumento es que garantiza un producto sin aerosol (Blidariu y Grozea 2011). Los defensores de la acuaponía desacoplada también buscan no aplicar herbicidas o pesticidas; sin embargo, debido al hecho de que el agua no se recircula a los peces desde las plantas, la capacidad de aplicar pesticidas y herbicidas a las plantas está presente (Goddek 2017). Por lo tanto, la aplicación o falta de aplicación de pesticidas y herbicidas al componente vegetal de los diseños acuapónicos se ven de manera diferente por los grupos que abogan por diferentes enfoques de diseño.

Existe la percepción de que la presencia de peces y plantas en el mismo sistema acuático proporciona efectos sinérgicos positivos para los peces y la salud de las plantas (Blidariu y Grozea 2011). Esto se ha demostrado

indirectamente por la capacidad que posee la acuaponía en algunos estudios para producir tasas de crecimiento de las plantas mayores que las observadas en la hidroponía estándar (Nichols y Lennard 2010; Delaide et al.2016). Sin embargo, no se ha establecido un vínculo causal directo entre la presencia de peces y plantas y ningún resultado positivo para los peces o la salud de las plantas.

REFERENCIAS

Baquedano E (1993) Aztec Inca & Maya. A Dorling Kindersley Book, Singapore

Blidariu F, Grozea A (2011) Increasing the economic efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics – review. Anim Sci Biotechnol 44(2):1–8

Boyd CE, Tucker CS (2012) Pond aquaculture water quality management. Springer Science and Business Media

Buzby KM, Lian-shin L (2014) Scaling aquaponic systems: balancing plant uptake with fish output. Aquac Eng 63:39–44

Cerozi BS, Fitzsimmons K (2017) Phosphorous dynamics modelling and mass balance in an aquaponics system. Agric Syst 153:94–100

COST FA1305 (2017) The EU aquaponics hub – realising sustainable integrated fish and vegetable production for the EU. https://euaquaponicshub.com

Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Haissam Jijakli M (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) (2016). Growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydro- ponics. Water 8(10):467

Eck M (2017) Taxonomic characterisation of bacteria communities from water of diversified aquaponic systems. Thesis for the partial fulfillment of a Masters Degree. Université de Liège, Liège

Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB, Hassan A (2010) A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. Technol 101:1511–1517

Fernandez V, Sotiropoulos T, Brown P (2013) Foliar fertilization: scientific principles and field practices, 1st edn. International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris

Goddek S (2017) Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems. Wageningen University, Wageningen

Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85

Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143–154

Goddek S, Vermeulen T (2018) Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. Aquac Int 26:1–10. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Vala Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7(4):4199–4224

Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jikali MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman J (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8(7):303. 1–29

Gooley GJ, Gavine FM (2003) Integrated agri-aquaculture systems: a resource handbook for Australian industry development. RIRDC Publication No. 03/012

Goto E, Both AJ, Albright LD, Langhans RW, Leed AR (1996) Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. Proceedings of the International Symposium in Plant Production in Closed Systems. Acta Hortic 440:205–210

Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156

Hallam M (2017) EC. Murray Hallam's practical aquaponics. https://aquaponics.net.au/ec/

Halwart M, Gupta MV (eds) (2004) Culture of fish in rice fields. FAO and The WorldFish Center, Penang Kalantari F, Tahir OM, Lahijani AM, Kalantari S (2017) A review of vertical farming technology: a guide for implementation. Adv Eng Forum 24:76–91

Karimanzira D, Keesman KJ, Kloas W, Baganz D, Raushenbach T (2016) Dynamic modelling of the INAPRO aquaponic system. Aquac Eng 75:29–45

Kloas W, Groß R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquac Envi- ron Interact 7:179–192. https://doi.org/10.3354/aei00146

Knaus U, Palm HW (2017) Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). Aquacul- ture 473:62–73

Komives T, Junge R (2015) Editorial: on the "aquaponic corner" section of the journal. Ecocycles 1 (2):1–2

Lennard WA (2005) Aquaponic integration of Murray Cod (Maccullochella peelii peelii) aquaculture and lettuce (Lactuca sativa) hydroponics. Thesis (Ph.D.). RMIT University, 2005

Lennard W (2017) Commercial aquaponic systems: integrating recirculating fish culture with hydroponic plant production. In press

Lennard WA, Leonard BV (2006) A comparison of three different hydropo-

nic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. Aquac Int 14:539–550
Love DC, Fry JP, Genello G, Hill ES, Frederick JA, Li X, Semmens K (2014) An international survey of aquaponics practitioners. PLoS One 9(7):E102662
Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015a) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74
Love DC, Uhl MS, Genello L (2015b) Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. Aquac Eng 68:19–27
Masser MP, Rakocy J, Losordo TM (1992) Recirculating aquaculture tank production systems. SRAC Publication No. 452. Southern Regional Aquaculture Center. USA
McMurtry M (1990) Performance of an integrated aquaculture-olericulture system as influenced by component ratio. PhD. dissertation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA
Monsees H, Kloas W, Wuertz S (2016) Comparison of coupled and decoupled aquaponics - Implications for future system design. Abstract from aquaculture Europe, 2016. Edinburgh, Scotland
Morehart CT (2016) Chinampa agriculture, surplus production and political change at Xaltocan, Mexico. Anc Mesoam 27(1):183–196
Nichols MA, Lennard W (2010) Aquaponics in New Zealand. Practical Hydroponics and Green-houses, 115: 46–51
Palm HW et al (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. Aquac Int 26(3):813–842
Pantanella E, Cardarelli M, Colla G, Rea A, Marcucci A (2010) Aquaponic vs hydroponic: production and quality of lettuce crop. Acta Hortic 927:887–893
Priva (2009) Eindrapport project EcoFutura, visteelt in de glastuinbouw. Priva B.V., Aqua-Terra Nova B.V., Green Q Group B.V., Groen Agro Control. www.ecofutura.nl
Rakocy JE (1989) Vegetable hydroponics and fish culture, a productive interface. World Aquacult 20:42–47
Rakocy JE, Hargreaves JA (1993) Integration of vegetable hydroponics with fish culture: a review. In: Wang J (ed) Techniques for modern aquaculture. American Society of Agricultural Engi- neers, St Joseph
Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Thoman ES (2004a) Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In: New Dimensions on Farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Manila, pp 676–690
Rakocy JE, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2004b) Aquaponic integration of Tilapia and Basil: Comparing a batch and staggered cropping

system. Acta Hortic 648:63–69
Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics – integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454. Southern Regional Aquaculture Center. USA
Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Danaher JJ (2011) A commercial scale aquaponic system developed at the University of the Virgin Islands. Proceedings of the 9th International Sympo- sium on Tilapia in Aquaculture
Resh HM (2013) Hydroponic food production, 7th edn. CRC Press, Boca Raton Reyes Lastiri D, Slinkert T, Cappon HJ, Baganz D, Staaks G, Keesman KJ (2016) Model of an aquaponic system for minimised water, energy and nitrogen requirements. Water Sci Technol 74:1. https://doi.org/10.2166/wst.2016.127
Roosta HR (2014) Effects of foliar spray of K on mint, radish, parsley and coriander plants in aquaponic system. J Plant Nutr 37(14):2236–2254
Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. Sci Hortic 129:396–402
Roosta HR, Hamidpour M (2013) Mineral nutrient content of tomato plants in aquaponic and hydroponic systems: Effect of foliar application of some macro-and micro-nutrients. J Plant Nutr 36(13):2070–2083
Savidov N (2005) Comparative study of aquaponically and hydroponically grown plants in model system. In: Evaluation and development of aquaponics production and product market capabil- ities in Alberta. Chapter 3.2., Phase II, pp 21–31
Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 589
Srivastava JK, Chandra H, Kalra SJ, Mishra P, Khan H, Yadav P (2017) Plant–microbe interaction in aquatic system and their role in the management of water quality: a review. Appl Water Sci 7:1079–1090
Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Schiebe G, Schmidt U (2016) Advanced Aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs conventional hydro- ponics. Agric Water Manag 178:335–344
Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST, Vinci BJ (2002) Recirculating aqua-culture systems, 2nd edn. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca
Tyson RV, Simonne EH, Treadwell DD, Davis M, White JM (2008) Effect of water pH on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. J Plant Nutr 31 (11):2018–2030
Tyson RV, Treadwell DD, Simonne EH (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. Hort Technol 21(1):6–13

Van Os E (1999) Design of sustainable hydroponic systems in relation to environment-friendly disinfection methods. Acta Hortic 548:197–205

Vimal SR, Singh JS, Arora NK, Singh S (2017) Soil-plant-microbe interactions in stressed agriculture management: a review. Pedosphere 27(2):177–192

Wongkiew S, Zhen H, Chandran K, Woo Lee J, Khanal SK (2017) Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. Aquac Eng 76:9–19

Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. Water 8:589. https://doi.org/10.3390/W8120589

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 6

RELACIONES BACTERIANAS EN ACUAPONÍA: NUEVAS DIRECCIONES DE INVESTIGACIÓN

Alyssa Joyce, Mike Timmons, Simon Goddek, and Timea Pentz

Capítulo 6.

RELACIONES BACTERIANAS EN ACUAPONÍA: NUEVAS DIRECCIONES DE INVESTIGACIÓN

Alyssa Joyce, Mike Timmons, Simon Goddek, and Timea Pentz

Resumen

Las tasas de crecimiento y bienestar de los peces y la calidad de la producción de plantas en sistema de acuaponÍa dependen de la composición y la salud de la microbiota del sistema. La productividad general depende de las especificaciones técnicas para la calidad del agua y su movimiento entre los componentes del sistema, incluida una amplia gama de parámetros que incluyen factores como el pH y las tasas de flujo que aseguran que los componentes microbianos puedan actuar eficazmente en los procesos de nitrificación y remineralización. En este capítulo, exploramos la investigación actual que examina el papel de las comunidades microbianas en tres unidades de un sistema de acuaponia: (1) el sistema de recirculación de la acuicultura (RAS) para la producción de peces que incluye sistemas de biofiltración para la desnitrificación; (2) las unidades hidropónicas para la producción de plantas; y (3) biofiltros y biorreactores, incluidos los sistemas de digestión de lodos (SDS) involucrados en la descomposición microbiana y la recuperación/remineralización de desechos sólidos. En las diversas subdisciplinas relacionadas con cada uno de estos componentes, existe literatura relacionada con las comunidades microbianas y su importancia dentro de cada sistema (por ejemplo, sistemas de recirculación acuícola (RAS), hidropónicos, biofiltros y digestores), pero actualmente hay un trabajo limitado para examinar las interacciones. entre estos

A. Joyce*
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Swede.
E-mail: alyssa.joyce@gu.se
M. Timmons
Biological & Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, USA.
E-mail: mbt3@cornell.edu
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
E-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
T. Pentz
Eat & Shine VOF, Velp, The Netherlands.
E-mail: timea.pentz@eatandshine.nl

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_6

componentes en el sistema acuapónico, lo que lo convierte en un área importante para futuras investigaciones.

Palabras clave: Microbiota; acuaponía; Biofiltros; Bioreactores; RA; Hidroponia; Metagenómica

6.1 INTRODUCCIÓN

La recirculación del agua en la parte de acuicultura de un sistema acuapónico contiene materia orgánica tanto particulada como disuelta (POM, DOM) que ingresa al sistema principalmente a través del alimento para peces; la porción de alimento que los peces no consumen ni metabolizan permanece como desecho en el agua del sistema de recirculación acuícola (RAS), ya sea en forma disuelta (por ejemplo, amonío) o como sólidos suspendidos o sedimentados (por ejemplo, lodos). Una vez que la mayor parte del lodo se elimina por separación mecánica, la materia orgánica disuelta restante aún debe eliminarse de un sistema RAS. Dichos procesos dependen de la microbiota en varios biofiltros para mantener la calidad del agua de los peces y para convertir los desechos inorgánicos/orgánicos en formas de nutrientes biodisponibles para las plantas. Las comunidades microbianas del sistema acuapónico incluyen bacterias, arqueas, hongos, virus y protistas en conjuntos que fluctúan en la composición basada en un flujo y reflujo de nutrientes y cambios en las condiciones ambientales como el pH, la luz y el oxígeno. Las comunidades microbianas desempeñan un papel importante en los procesos de desnitrificación y minería (véase el capítulo 10) y, por lo tanto, tienen roles clave en la productividad general del sistema, incluido el bienestar de los peces y la salud de las plantas.

Los desafíos dentro de cualquier sistema acuapónico son controlar los insumos (agua, peces, alimento, plántulas) y su microbiota asociada para maximizar los beneficios de la materia orgánica y su descomposición en formas biodisponibles para los organismos objetivos. Dado que los parámetros óptimos de crecimiento ambiental y los nutrientes difieren para peces y plantas (ver Capítulo 8), varios sistemas de separación y aireación y biofiltros que contienen ensambles microbianos relevantes, deben ubicarse en puntos estratégicos en el suministro de agua para ayudar a mantener los niveles de nutrientes. pH y niveles de oxígeno disuelto (OD) dentro de los rangos deseados para peces y especies de plantas objetivo. De hecho, los parámetros de calidad del agua, que incluyen temperatura, OD, conductividad eléctrica, potencial redox, niveles de nutrientes, dióxido de carbono, iluminación, alimentación y

tasas de flujo, afectan el comportamiento y la composición de las comunidades microbianas dentro de un sistema de acuaponía (Junge et al. 2017). En este sentido, es importante refinar la configuración y el funcionamiento para que cada unidad aporte las cantidades adecuadas de formas de nutrientes biodisponibles a su sucesor, en lugar de permitir la proliferación de patógenos o microbios oportunistas que pueden consumir la mayor parte de los macronutrientes necesarios aguas abajo.

Varias técnicas para el análisis de comunidades microbianas pueden proporcionar información importante sobre los cambios en la estructura y función de la comunidad a lo largo del tiempo en diferentes configuraciones de acuaponía. Al correlacionar estos cambios con la biodisponibilidad de nutrientes y los parámetros operativos, es posible reducir la producción excesiva o insuficiente de nutrientes esenciales o la producción de subproductos nocivos. Por ejemplo, maximizar la recuperación de nutrientes vegetales beneficiosos de la materia orgánica residual en el componente de los desechos de los peces depende principalmente de la capacidad de la microbiota para facilitar la descomposición de nutrientes dentro de una serie de biofiltros y digestores de lodos, cuyo rendimiento se basa en una gama de parámetros operativos tales como tasas de flujo, tiempo de residencia y pH (Van Rijn 2013). Como no todos los sistemas acuapónicos incluyen digestores de lodo, abordaremos este aspecto con más detalle en la segunda parte de esta revisión, aunque se remite al lector al Cap. 3 para más detalles sobre técnicas de separación de sólidos y a los Caps. 7 y 8 para discusiones sobre los sistemas de acuaponía acoplado vs desacoplado. Si consideramos aquí solo partículas disueltas y suspendidas en el agua (y no lodo), todos los sistemas acuapónicos emplean una gama de diferentes biofiltros que exponen a los microorganismos unidos con la materia orgánica que pasa a través del filtro y proporcionan un sustrato apropiado y una superficie suficiente para la fijación microbiana y la formación de biopelículas. La degradación de esta materia orgánica proporciona energía a las comunidades microbianas, que a su vez liberan macronutrientes (por ejemplo, nitrato, ortofosfato) y micronutrientes (por ejemplo, hierro, zinc, cobre) de regreso al sistema en formas utilizables (Blancheton et al. 2013; Schreier et al. 2010; Vilbergsson et al.2016a).

Existe una considerable investigación agrícola sobre el papel de la microbiota en las plantas. enraizamiento, crecimiento y salud. La preponderancia de esta investigación se centra en los sistemas basados en el suelo; Sin embargo, la investigación sobre hidroponía también ha aumentado en los últimos años (Bartelme et al.2018). La microbiota en la acuicultura también se ha caracterizado de manera similar, donde el papel

de los microbios en la salud y la digestión de los peces ha recibido considerable atención a medida que los investigadores intentan caracterizar mejor el papel que desempeñan en la salud intestinal y en la asimilación de nutrientes. Dada la importancia de la biofiltración en los sistemas RAS, las bacterias involucradas en el proceso de nitrificación para RAS también han sido comparativamente bien estudiadas y, por lo tanto, no se abordarán aquí (ver Capítulos 10 y 12). Sin embargo, la investigación sobre los microbios en el sistema acuapónico, especialmente las interacciones cruciales de la microbiota entre los diversos compartimentos del sistema. Esta falta de investigación actualmente limita el alcance y la productividad de tales sistemas, donde existe un potencial considerable de mejora con prebióticos y probióticos, así como otras oportunidades para mejorar la salud del sistema de acuaponia a través de una mejor comprensión y, por lo tanto, una mejor capacidad para controlar , el vasto conjunto de microbiota no caracterizada que afecta la salud y el rendimiento del sistema.

Como tal, este capítulo se centra principalmente en estudios recientes que revelan cómo y dónde las comunidades microbianas determinan la productividad dentro de los compartimentos, al tiempo que destacan el número relativamente pequeño de estudios que vinculan esas comunidades microbianas a las interacciones entre los componentes y la productividad general del sistema. Intentamos identificar los vacíos en las que un mayor conocimiento sobre las comunidades microbianas podrían resolver los problemas operativos y proporcionar información importante para mejorar la eficiencia y la confiabilidad.

6.2 HERRAMIENTAS PARA ESTUDIAR COMUNIDADES MICROBIANAS

Las nuevas tecnologías para estudiar cómo cambian las comunidades microbianas con el tiempo y qué grupos de organismos predominan en condiciones ambientales particulares, cada vez ofrecen más oportunidades para anticipar resultados adversos dentro de los componentes del sistema y, por lo tanto, conducen al diseño de mejores sensores y pruebas para un monitoreo efectivo de comunidades microbianas en peces o cultivos de plantas. Por ejemplo, varias tecnologías "ómicas"-metagenómica, metatranscriptomía, comunidad proteómica, metabolómica- permiten cada vez más a los investigadores estudiar la diversidad de la microbiota en sistemas RAS, biofiltros, sistemas hidropónicos y sistemas de digestión de lodos donde el muestreo incluye conjuntos microbianos completos en lugar de un genoma determinado. El análisis de la diversidad procariota en particular, ha sido enormemente ayudado en las últimas décadas por las

técnicas metagenómicas y metatranscriptomicas. En particular, la amplificación y el análisis de secuencia del gen 16S rRNA, basado en la conservación intraespecífica de secuencias de genes neutrales que parpadean operones ribosomales en el ADN bacteriano, se ha considerado el "estándar de oro" para la clasificación taxonómica y la identificación de especies bacterianas. Dichos datos también se utilizan en microbiología para rastrear epidemias y distribuciones geográficas y estudiar poblaciones bacterianas y filogenias (Bouchet et al. 2008). La metodología puede ser laboriosa y costosa, pero los recientes sistemas automatizados, aunque no son necesariamente discriminatorios a nivel de especies y cepas, ofrecen oportunidades de aplicación en entornos de acuaponía (Schmautz et al.2017). Las revisiones recientes resumen las aplicaciones de 16SrRNA en lo que respecta a RAS (Martínez-Porchas y Vargas-Albores 2017; Munguia-Fragozo et al. 2015; Rurangwa y Verdegem 2015). Los avances en la metagenómica de microbios distintos de las bacterias encontradas en RAS y los cultivos hidropónicos se basan en metodologías similares, pero utilizan clones 18S (eucariotas), 26S (hongos) y 16S en combinación con bibliotecas de clones de ARNr 26S (levaduras) para caracterizar estas microbiotas (Martínez-Porchas y Vargas - Albores 2017). Las bibliotecas detalladas de ARNr, por ejemplo, también se han utilizado en hidroponía para caracterizar comunidades microbianas en la rizosfera (Oburger y Schmidt 2016). Dichas bibliotecas pueden ser particularmente útiles en acuaponía, dado que pueden examinar el ensamblaje de microorganismos como bacterias, arqueas, protozoos y hongos y proporcionar retroalimentación sobre los cambios dentro del sistema.

El desarrollo de la secuenciación automática de próxima generación (NGS) también ha permitido el análisis de datos de genomas de muestras de población (metagenómica) que pueden usarse para caracterizar la microbiota, revelar cambios filogenéticos espacio-temporales y rastrear patógenos. Las aplicaciones en RAS incluyen el rastreo de ciertas cepas bacterianas entre peces cultivados y la eliminación de poblaciones que portan cepas virulentas, al tiempo que preservan los portadores de otras cepas (revisión: (Bayliss et al. 2017). Los enfoques metagenómicos pueden ser independientes del cultivo y la amplificación, lo que permite previamente que especies no cultivables se conozcan y sean investigadas por sus posibles efectos (Martínez-Porchas y Vargas-Albores 2017). Las técnicas de secuenciación de próxima generación se usan comúnmente en microbiología de plantas junto con análisis de seguimiento de metatranscriptómica. Un excelente ejemplo es el primer todo -planta estudio de comunidades microbianas en la rizosfera, donde se demostró que los exudados de las raíces se correlacionan con las etapas de desarrollo (Knief 2014).

La proteómica es más útil cuando se estudia una especie o cepa bacteriana particular en condiciones ambientales específicas para describir su patogenicidad o posible papel en la simbiosis. Sin embargo, hay avances en la proteómica comunitaria que se basan en estudios metagenómicos previos y utilizan diversas técnicas bioquímicas para identificar, por ejemplo, proteínas secretadas asociadas con comunidades microbianas comensales o simbióticas, y abundan las posibilidades a medida que avanza la capacidad de las tecnologías NGS rápidamente (revisión: (Knief et al. 2011).

La metabolómica caracteriza las funciones de los genes, pero las técnicas no son específicas de un organismo ni dependen de la secuencia y, por lo tanto, pueden revelar la amplia gama de metabolitos que son productos finales de la bioquímica celular en organismos, tejidos, células o compartimentos celulares (dependiendo de qué muestras se analicen). No obstante, el conocimiento sobre el metaboloma de las comunidades microbianas en condiciones ambientales particulares (microcosmos) revela mucho sobre el ciclo biogeoquímico de los nutrientes y los efectos de las perturbaciones. Estos conocimientos caracterizan varias vías metabólicas y el rango de metabolitos presentes en las muestras. Los análisis bioquímicos y estadísticos posteriores pueden señalar estados fisiológicos que a su vez pueden correlacionarse con parámetros ambientales que pueden no ser evidentes a partir de enfoques genómicos o proteómicos. Sin embargo, la combinación de la metabolómica con los estudios de función genética tiene un enorme potencial para promover la investigación en acuaponía; ver reseña (van Dam y Bouwmeester 2016).

6.3 CONSIDERACIONES DE BIOSEGURIDAD PARA LA SEGURIDAD ALIMENTARIA Y EL CONTROL DE PATÓGENOS

6.3.1 Seguridad Alimentaria

La buena inocuidad de los alimentos y garantizar el bienestar de los animales son las principales prioridades para obtener apoyo público para la acuaponía. Una de las cuestiones más frecuentes planteadas por los expertos en seguridad alimentaria en relación con la acuaponía es el riesgo potencial de contaminación con patógenos humanos cuando se utiliza el efluente de los peces como fertilizante para las plantas (Chalmers 2004; Schmautz et al. 2017). Una búsqueda reciente en la literatura para determinar los riesgos zoonóticos en acuaponía concluyó que los patógenos en el agua de consumo contaminada, o los patógenos en los componentes de los alimentos que se originan con animales de sangre caliente, pueden asociarse con la microbiota intestinal, que, aunque no sea

perjudicial para los peces, pueden pasar potencialmente por la cadena alimentaria a los humanos (Antaki y Jay-Russell 2015). Los mecanismos de introducción de patógenos a un sistema de acuaponía son, por lo tanto, preocupantes, ya que la fuente más probable de coliformes fecales u otras bacterias patógenas se derivan de los insumos de alimento para peces. Desde una perspectiva biológica, existen riesgos potenciales de que estos patógenos proliferen en biofiltros o en sistemas de un circuito mediante la introducción de patógenos transportados por el aire desde componentes de plantas abiertas de regreso a los tanques de los peces. Aunque los riesgos de bioseguridad son bajos en el espacio ambiental relativamente cerrado de un sistema acuapónico, en comparación con la acuicultura en estanques abiertos, y son aún más bajos en los sistemas acuapónicos desacoplados, en los que se pueden aislar partes del sistema, todavía existe la percepción de que los lodos de los peces podrían ser potencialmente peligrosos cuando se aplican a plantas para el consumo humano. La *Escherichia coli* (*E. coli*) es un patógeno entérico humano que causa enfermedades alimentarias y ha sido una de las principales preocupaciones en relación al uso de desechos animales como fertilizante en la agricultura o la acuicultura, por ejemplo, los sistemas integrados de cerdos y peces (Dang y Dalsgaard 2012). Sin embargo, generalmente no se considera que presente un riesgo en la acuaponía de plantas y peces. Por ejemplo, Moriarty et al. (2018) demostró previamente que el tratamiento con radiación UV puede reducir con éxito *E. coli*, pero también observó que los coliformes detectados en el sistema acuapónico estaban a niveles de fondo y no proliferaron en los canales de los peces o en la lechuga cultivada hidropónicamente dentro del sistema experimental, y por lo tanto, no presentó un riesgo para la salud. Hay investigaciones limitadas sobre estos aspectos, pero algunos estudios preliminares han encontrado riesgos muy bajos de contaminación por coliformes, por ejemplo, al no mostrar diferencias en los niveles de coliformes de los tratamientos de agua RAS esterilizados y no esterilizados aplicados a las plantas (Pantanella et al. 2015) A pesar de que existe un riesgo potencial de internalización de microbios dentro de las hojas de las plantas y, por lo tanto, su transmisión a las porciones consumidas de algunas plantas frondosas comestibles cultivadas en acuaponía, otros estudios han llegado a conclusiones similares de que los riesgos son mínimos de introducir patógenos humanos potencialmente peligrosos. (Elumalai et al. 2017).

Sin embargo, la gestión de riesgos, o más importante, la gestión de las percepciones de esos riesgos, sigue siendo una alta prioridad para las autoridades gubernamentales y los inversores en acuaponía. Se supone que el control de calidad de los insumos de alimentación y el manejo cuidadoso de los peces/desechos de los peces pueden limitar la mayoría de

estas preocupaciones potenciales (Fox et al. 2012). De hecho, hasta la fecha no se han reportado incidentes conocidos de salud humana en relación con el sistema de acuaponía, y esto puede ser una función del hecho de que las instalaciones RAS y los invernaderos hidropónicos suelen tener buenas medidas de bioseguridad, incluidas prácticas de higiene y cuarentena que se observan estrictamente. Las prácticas microbiológicas recomendadas para la bioseguridad se han evaluado para diferentes sistemas de producción acuícola y las recomendaciones se han formulado en las directrices de Análisis de peligros Puntos Críticos de Control, un sistema internacional de control de la seguridad alimentaria (Orriss y Whitehead 2000). Sin embargo, todavía existe la necesidad de una mejor documentación científica de los riesgos de las transferencias de patógenos a los humanos, y la investigación directa sobre el manejo en esta área de producción acuapónica.

6.3.2 Patógenos de peces y plantas

Existe literatura específica sobre la disciplina en acuicultura, hidroponía y bioingeniería que puede ayudar a informar y mejorar el rendimiento microbiano en la acuaponía. Por ejemplo, las comunidades microbianas cumplen una amplia gama de funciones importantes en la salud de los peces, incluido el papel clave en la digestibilidad y asimilación de los alimentos, así como la inmunomodulación, y estas funciones, así como el papel de los probióticos en la mejora de los sistemas de acuicultura están bien revisado (Akhter et al. 2015). El papel de los microbios en los sistemas RAS específicamente también está bien cubierto, incluido el manejo microbiano de los biofiltros, así como la investigación sobre el control de patógenos, y las diversas técnicas para controlar los malos olores derivados de los sistemas RAS (Rurangwa y Verdegem 2015). Asimismo, los microbios en la rizosfera de las plantas son importantes para el enraizamiento y el crecimiento de las plantas (Dessaux et al. 2016), pero también para controlar la propagación de patógenos en la producción de plantas hidropónicas; estas áreas están bien exploradas en una revisión reciente de Bartelme et al. (2018). Sin embargo, todavía existe una comprensión muy limitada de los vínculos en el microbioma entre los compartimentos del sistema de acuaponía, conocimiento que es crucial para maximizar la productividad y reducir la transferencia de patógenos.

La proliferación de patógenos oportunistas que son peligrosos para los peces o la salud de las plantas son consideraciones importantes en la economía de las operaciones de acuaponía, dado que cualquier uso de antibióticos o desinfectantes puede tener un efecto potencialmente perjudicial sobre la función del biofiltro, así como desestabilizar las relaciones microbianas en otros compartimentos del sistema. Los

protocolos de desinfección comúnmente utilizados en RAS incluyen el tratamiento del agua con luz ultravioleta (Elumalai et al.2017), que, combinado con ozono (y generalmente una combinación de ambos), comprende un enfoque abiótico de primera línea para mantener la calidad del agua. Los huevos / larvas de peces también se ponen en cuarentena a menudo antes de ser introducidos, y se trata cualquier agua de entrada, reduciendo así las fuentes potenciales directas de entrada de patógenos de peces al sistema.

El agua entrante a RAS también se permite "madurar" en biofiltros antes de ser alimentada al sistema de recirculación. Los experimentos, por ejemplo, han demostrado que inocular un prefiltro con una mezcla de bacterias nitrificantes y 'alimentarlo' con materia orgánica hasta que las poblaciones bacterianas coincidan con la capacidad de carga de los tanques de peces, significa que es menos probable que el agua del tanque de cría sea inestable y superado por bacterias oportunistas (Attramadal et al.2016; Rurangwa y Verdegem 2015). Sin embargo, en caso de que los patógenos se vuelvan problemáticos, a veces puede ser necesario el uso de tratamientos con dosis altas de UV, ozono, químicos o antibióticos, aunque dicho uso es generalmente perjudicial para otros compartimentos del sistema, especialmente los biofiltros (Blancheton et al. 2013). De hecho, dependiendo de la dosis y la ubicación dentro del sistema, los tratamientos no selectivos para los patógenos pueden favorecer la proliferación de oportunistas. Por ejemplo, los altos niveles de tratamiento con ozono no solo matan bacterias, protistas y virus, sino que también oxidan el DOM y afectan la agregación de POM, ejerciendo así una presión de selección sobre las poblaciones bacterianas (*ibid.*).

En el capítulo 14 se incluye una discusión detallada de los patógenos de las plantas en el sistema de acuaponía y su control y por lo tanto no se reitera aquí. Sin embargo, vale la pena señalar que las especies de Bacillus se usan rutinariamente como probióticos comerciales en la acuicultura, y existe una creciente evidencia de que especies similares de Bacillus también son efectivas para las plantas, que ya están disponibles en algunas soluciones comerciales de probióticos hidropónicos (Shafi et al. 2017) . Un estudio reciente ha extendido tales estudios sobre *Bacillus* para incluir la experimentación en el sistema acuapónico (Cerozi y Fitzsimmons 2016b). La ubicación donde se introducen los probióticos, en los peces, plantas o biofiltros, puede ser importante, pero el trabajo existente no deja claro si la adición de probióticos en el componente de peces, con beneficios potenciales para los peces, también tiene mejores efectos en el crecimiento y la salud de las plantas en relación con la adición de niveles similares de probióticos directamente al compartimento hidropónico.

Además de los probióticos de aplicación estándar, hay una variedad de técnicas innovadoras para el biocontrol que en el futuro pueden ser cada vez más valiosas para reducir la presencia y proliferación de microbios dañinos. En un estudio reciente, los aislamientos bacterianos se seleccionaron de un sistema de acuaponía establecido en función de su capacidad de ejercer efectos inhibitorios sobre los patógenos fúngicos de peces y plantas. La meta fue cultivar estos aislamientos como inóculos que posteriormente podrían actuar como controles biológicos para enfermedades dentro de ese sistema de acuaponía (Sirakov et al.2016). Para ejemplo, Sirakov et al. demostró que una *Pseudomonas* sp. que aislaron fue efectivo como biocontrol para los hongos patógenos *Saprolegnia parasitica* de los peces y *Pythium ultimum* de las plantas. Los investigadores también informaron la inhibición in vitro de una variedad de otros aislamientos bacterianos de los diferentes compartimentos de acuaponía, pero sin probar sus efectos in vivo. El potencial para usar tales aislamientos como controles biológicos no es nuevo, pero las aplicaciones de las técnicas de NGS ahora pueden revelar más acerca de las interacciones de dichos aislamientos entre sí y con posibles patógenos, lo que permite optimizar la efectividad de la entrega. El uso de otras técnicas "ómicas" podría ayudar a revelar la estructura general de la comunidad y las funciones metabólicas asociadas, y comenzar a dilucidar qué organismos y funciones son más beneficiosos. En el futuro, tales técnicas podrían permitir la selección de "cepas auxiliares" dentro de las comunidades microbianas, o la identificación de exudados que tienen efectos antimicrobianos (Massart et al. 2015).

6.4 EQUILIBRIO MICROBIANO Y MEJORA EN UNIDADES DE ACUAPONÍA

El sistema de productividad en acuaponía implica el monitoreo y la gestión de parámetros ambientales para proporcionar a cada componente, ya sea microbiano, animal o vegetal, condiciones óptimas de crecimiento. Si bien esto no siempre es posible dadas las compensaciones en los requisitos, uno de los objetivos clave de la acuaponía gira en torno al concepto de homeostasis, en el que mantener la estabilidad del sistema implica ajustar los parámetros operativos para minimizar las perturbaciones innecesarias que causan estrés dentro de una unidad, o perjudiciales efectos sobre otros componentes. Con conjuntos microbianos en constante cambio, la homeostasis nunca implica un estado permanente de equilibrio, sino más bien un objetivo de lograr la mayor estabilidad posible, particularmente dentro de los parámetros de calidad del agua.

Un RAS acoplado a un sistema hidropónico cambiará constantemente, pero dentro de esta configuración, el componente RAS permanece relativamente estable, particularmente en sistemas desacoplados (Goddek y Körner 2019). El sistema hidropónico, por otro lado, tiende a ser más errático en la calidad del agua ya que los cultivos de plantas a menudo se cosechan en lotes, y rara vez en sincronía con la producción de peces.

Durante la fase inicial de puesta en marcha de cualquier sistema de acuaponia, la calidad del agua, particularmente con respecto a las comunidades microbianas en los biofiltros, es una preocupación, y para minimizar la proliferación de bacterias oportunistas, una práctica rutinaria ha sido permitir la maduración microbiana del agua de entrada. antes de su introducción en el RAS, agregar peces solo después de que la capacidad de los biofiltros coincida con la capacidad de carga de los tanques de cría a una densidad de población particular (Blancheton et al. 2013). Una práctica similar se observa en la hidroponía, donde al menos una porción de agua reciclada se usa para inocular un nuevo cultivo, dado que las comunidades microbianas maduras toman tiempo para desarrollarse e introducir todos los resultados de agua nueva en largos tiempos de retraso. Dichas prácticas conducen a una mayor estabilidad en las condiciones de cultivo y a una mayor productividad. Por ejemplo, se ha observado un mejor rendimiento en los sistemas RAS cuando el filtro previo a la ingesta se suministra con alimentos para peces pulverizado para desarrollar comunidades microbianas más similares a las de los tanques de cría (Attramadal et al. 2014).

6.5 ROLES BACTERIANOS EN EL CICLO DE NUTRIENTES Y LA BIODISPONIBILIDAD

Se han llevado a cabo numerosas investigaciones para caracterizar las bacterias heterotróficas y autótrofas en los sistemas RAS y para comprender mejor su papel en el mantenimiento de la calidad del agua y el ciclo de nutrientes (para revisiones, ver Blancheton et al. (2013); Schreier et al. (2010)). Los heterótrofos no patógenos, típicamente dominados por *Alphaproteobacteria* y *Gammaproteobacteria*, tienden a prosperar en biofiltros, y sus contribuciones a las transformaciones de nitrógeno se conocen bastante bien porque el ciclo del nitrógeno (NC) ha sido de suma importancia en el desarrollo de sistemas de cultivo en recirculación (Timmons y Ebeling 2013). Hace tiempo que se reconoce que la transformación bacteriana del amonío excretado por los peces en un sistema RAS debe coincidir con las tasas de excreción, porque el exceso de amonío se convierte rápidamente en tóxico para los peces (véase el capítulo 9). Por lo tanto, en agua dulce y RAS marino, los roles funcionales

de las comunidades microbianas en la dinámica de NC: nitrificación, desnitrificación, amonificación, oxidación anaeróbica del amonio y la reducción disimilatoria del nitrato han recibido una atención considerable por parte de la investigación y están bien descritos en revisiones recientes (Rurangwa y Verdegem 2015; Schreier y col. 2010). Hay muchos menos estudios sobre las transformaciones de nitrógeno en acuaponía, pero una revisión reciente (Wongkiew et al. 2017) proporciona un resumen junto con una discusión sobre la eficiencia de la utilización de nitrógeno, que es una consideración primordial para el crecimiento de las plantas en hidroponía. Después del nitrógeno, el segundo macronutriente más esencial en acuaponía es el fósforo, que no es un factor limitante para los peces que lo adquieren del alimento, pero es crucial para las plantas en hidroponía. Sin embargo, las formas de fosfato en los desechos de los peces no están biodisponibles de inmediato para las plantas. Las plantas deben tener cantidades adecuadas de ortofosfato iónico inorgánico ($H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} = *Pi*) (Becquer et al. 2014), ya que esta es la única forma biodisponible para la absorción y asimilación. El fosfato inorgánico se une al calcio por encima de pH 7.0, por lo que el sistema de acuaponía debe tener cuidado de mantener las condiciones de pH cercanas a pH 7.0. A medida que los valores de pH aumentan por encima de 7.0, varias formas insolubles de fosfato de calcio pueden terminar como precipitados en el lodo (Becquer et al. 2014; Siebielec et al. 2014). Por lo tanto, las pérdidas RAS de P se deben principalmente a la eliminación del lodo del sistema (Van Rijn 2013). Sin embargo, en algún lugar del sistema de acuaponía, las partículas deben capturarse y dejarse mineralizar para proporcionar suministros suficientes de nutrientes utilizables para los cultivos en la unidad de hidroponía. El paso de mineralización también liberará otros macro y micronutrientes para que haya menos deficiencias, reduciendo así la necesidad de suplementación en el compartimento hidropónico. Dado que los suministros mundiales de fertilizantes ricos en fosfato están disminuyendo y la suplementación con P es cada vez más costosa, se están haciendo esfuerzos para maximizar la recuperación de P del lodo RAS (Goddek et al. 2016b; Monsees et al. 2017).

La biodisponibilidad de macro y micronutrientes es actualmente poco conocida. Investigaciones previas (Cerozi y Fitzsimmons 2016a) sugieren que la disponibilidad de nutrientes se ve comprometida a medida que el pH se reduce por debajo de 7.0 y ha resultado en un sistema de hidroponía acoplado para verduras de hoja verde que opera alrededor de pH 6.0. Sin embargo, una investigación reciente que compara las condiciones acuaponicas y pH 7.0 con las condiciones hidropónicas de pH 5.8 no mostró diferencias en la productividad (Anderson et al. 2017a, b). En estos estudios, las condiciones hidropónicas a pH 7.0 redujeron la productividad

en ~ 22% en comparación con el pH hidropónico de 5.8. Inicialmente, la hipótesis era que las diferencias en productividad podrían atribuirse a la microbiota del agua acuapónica, pero la investigación posterior desestimó esa teoría (Wielgosz et al. 2017).

En RAS donde las proporciones de C:N aumentan debido a la disponibilidad de materia orgánica, las bacterias desnitrificantes, especialmente *Pseudomonas* sp., usan carbono como donante de electrones en condiciones anóxicas, para producir N_2 a expensas del nitrato (Schreier et al. 2010; Wongkiew et al.2017). Los sistemas de biofloc a veces se usan para aumentar el alimento para peces (Crab et al. 2012; Martínez-Córdova et al. 2015), y el biofloc se usa cada vez más en el sistema de acuaponía, especialmente en Asia (Feng et al.2016; Kim et al. 2017; Li et al.2018). Cuando se utiliza biofloc en acuaponía (da Rocha et al. 2017; Pinho et al. 2017), el ciclo de nutrientes se vuelve aún más complejo dado que el OD, la temperatura y el pH influyen en si las comunidades microbianas heterotróficas (que utilizan el carbono) predominan sobre los desnitrificadores autotróficos que son capaces de reducir el sulfuro a sulfato (Schreier et al.2010). Los heterótrofos tienden a tener una mayor tasa de crecimiento que los autótrofos en presencia de fuentes adecuadas de carbono (Michaud et al. 2009); por lo tanto, manipular los tipos o regímenes de alimentación, o agregar una fuente de carbono orgánico directamente, mientras se monitorean los niveles de oxígeno disuelto, puede ayudar a mantener las poblaciones equilibradas y al mismo tiempo proporcionar hidroponía con N en una forma utilizable (Vilbergsson et al. 2016a).

En el sistema hidropónico, el ciclo de nutrientes ha sido menos estudiado, ya que los compuestos inorgánicos que contienen el equilibrio de nutrientes requerido generalmente se agregan para asegurar el crecimiento adecuado de la planta. Sin embargo, las altas concentraciones de nutrientes, especialmente en ambientes húmedos y cálidos como los invernaderos, facilitan fácilmente el crecimiento de comunidades microbianas, especialmente fitopatógenos como los hongos (*Fusarium*) y oomycota (*Phytophthora, Pythium* sp.), que pueden propagarse rápidamente en el agua circulante y puede resultar en muertes (Lee y Lee 2015). Los esfuerzos recientes para comprender mejor las rizobacterias hidropónicas y sus efectos beneficiosos en la promoción del crecimiento de las plantas (pero también para inhibir la proliferación de patógenos) han utilizado diversas técnicas "ómicas" para analizar las comunidades microbianas y sus interacciones con los sistemas de raíces (Lee y Lee 2015).

Por ejemplo, cuando las bacterias probióticas como Bacillus están

presentes, se demostró que aumentan la disponibilidad de P y también parecen tener un efecto adicional que promueve el crecimiento de las plantas en un sistema de lechuga y tilapia (Cerozi y Fitzsimmons 2016b).

En el sistema de acuaponía, la adición de probióticos al alimento para peces y al agua RAS, así como al suministro de agua hidropónica, merece más experimentación, ya que las comunidades microbianas pueden tener múltiples efectos moduladores en la fisiología de la planta. Por ejemplo, las comunidades microbianas (bacterias, hongos, oomicetos) de cuatro cultivos alimentarios se analizaron por secuencia metagenómica cuando se mantuvieron en una película de nutrientes constante. sistema hidropónico donde se permitió que el pH y las concentraciones de nutrientes fluctuaran naturalmente a lo largo de los ciclos de vida de las plantas (Sheridan et al. 2017). Los autores concluyeron que el tratamiento con una mezcla comercial de microbios que promueven el crecimiento de las plantas (PGPM), en este caso bacterias, micorrizas y hongos, parece conferir una mayor estabilidad y similitudes en la composición de la comunidad después de 12 a 14 semanas que en los controles. Sugieren que esto podría atribuirse a los exudados de raíces, que supuestamente favorecen e incluso controlan el desarrollo de comunidades microbianas apropiadas para las etapas sucesivas de desarrollo de las plantas. Dados los efectos conocidos de las PGPM en la producción de cultivos basados en el suelo, y los pocos estudios disponibles para sistemas sin suelo, se justifica una mayor investigación para determinar cómo mejorar las PGPM y mejorar sus efectos en el sistema de acuaponía (Bartelme et al.2018). Si los cultivos hidropónicos son más estables y el crecimiento de las plantas es más robusto con las PGPM, entonces el objetivo debe ser caracterizar las comunidades microbianas en acuaponía a través de la metagenómica y correlacionarlas con una disponibilidad óptima de macro y micronutrientes a través de la metabolómica y la proteómica.

6.6 SÓLIDOS SUSPENDIDOS Y LODOS

Los parámetros para operar la acuaponía a una escala dada, incluyendo el volumen de agua, la temperatura, las tasas de alimentación y flujo, el pH, la edad y la densidad de los peces y los cultivos, todos afectan la distribución temporal y espacial de las comunidades microbianas que se desarrollan dentro de sus compartimentos, para revisiones: RAS (Blancheton et al. 2013); hidroponía (Lee y Lee 2015).

Además de controlar el oxígeno disuelto, los niveles de dióxido de carbono y el pH en acuaponía, también es esencial controlar la acumulación de sólidos en el sistema RAS ya que las partículas finas suspendidas pueden

adherirse a las branquias, causar abrasión y dificultad respiratoria y aumentar la susceptibilidad a la enfermedad (Yildiz et al.2017). Más relevante, la materia orgánica particulada (POM) debe eliminarse de manera rápida y efectiva de los sistemas RAS, de lo contrario, el crecimiento heterotrófico excesivo hará que la mayoría de los procesos unitarios fallen. Las tasas de alimentación de RAS deben gestionarse cuidadosamente para minimizar la carga de sólidos en el sistema (por ejemplo, evitar la sobrealimentación y minimizar los costos de alimentación). Las propiedades biofísicas del alimento (tamaño de partícula, contenido de nutrientes, digestibilidad, atractivo sensorial, densidad y tasa de sedimentación) determinan las tasas de ingestión y asimilación, que a su vez tienen un impacto en la acumulación de sólidos y, por lo tanto, en la calidad del agua. Aunque la calidad del agua se estudia con frecuencia en el contexto del ciclo de nutrientes (véase el capítulo 9), también es importante obtener una mejor comprensión de la composición de la comunicación microbianas y cambios en estos basados en la composición del alimento, la carga de partículas y cómo esto influye en el crecimiento de comunidades bacterianas heterotróficas y autotróficas.

Se han desarrollado varias características de los diseños de sistemas RAS específicamente para tratar con sólidos (Timmons y Ebeling 2013); ver también revisión: (Vilbergsson et al.2016b). Por ejemplo, algunos biofiltros funcionan para mantener porciones sustanciales de desechos suspendidos para facilitar la degradación, mientras que otros se filtran mecánicamente a través de pantallas o medios granulares. Aún otros confían en la sedimentación para simplemente recolectar y eliminar lodo Sin embargo, tales métodos no son particularmente efectivos para recuperar nutrientes dentro del lodo y hacerlo biodisponible para el uso de la planta. Históricamente, este lodo ha sido manejado en biorreactores por su valor metanogénico o deshidratado para ser utilizado como fertilizante para cultivos a base de suelo, pero varios diseños más nuevos han intentado mejorar la recuperación para su uso en el componente hidropónico. Mejorar la recuperación de este lodo es un área importante de investigación dado que una porción significativa de los macro y micronutrientes esenciales requeridos para el crecimiento de las plantas están unidos a la materia orgánica en partículas que, si se desecha, se pierde del sistema. Al agregar un ciclo adicional de reciclaje de lodos al sistema de acuaponía, los desechos sólidos se pueden convertir en nutrientes disueltos para su reutilización por las plantas en lugar de ser descartados (Goddek et al. 2018). Los digestores o los biorreactores remineralizantes son una forma de lograr esto, sin embargo, una de las áreas clave que actualmente está subdesarrollada incluye el conocimiento de cómo las comunidades microbianas dentro de estos digestores de lodo

pueden mejorarse (por ejemplo, mediante la adición de microbios) o utilizarse mejor (por ejemplo, a través de mejores diseños de ingeniería de reactores vinculados) para recuperar nutrientes en formas biodisponibles para plantas. A pesar de que las comunidades microbianas reales dentro de los digestores de lodos no han sido bien investigadas para acuaponía, existe una considerable literatura sobre la microbiota de los digestores de lodos para aguas residuales y desechos animales en la agricultura, incluidos los efluentes de peces, que pueden proporcionar una mejor comprensión de los diseños ideales para la recuperación de lodos. en el sistema de acuaponia. La investigación actual sobre la incorporación de lodos en el sistema de acuaponia implica la remineralización en digestores situados entre el RAS y la unidad hidropónica (Goddek et al. 2016a, 2018). Dentro de los biorreactores aeróbicos o anaeróbicos, las condiciones ambientales que son favorables para la degradación de los desechos pueden descomponer efectivamente este lodo en nutrientes biodisponibles, que posteriormente pueden ser entregados al sistema hidropónico sin la presencia de tierra (Monsees et al. 2017). Muchos sistemas de acuaponia de un circuito ya incluyen digestores aeróbicos (Rakocy et al. 2004) y anaeróbicos (Yogev et al. 2016) para transformar los nutrientes atrapados en el lodo de peces y hacerlos biodisponibles para las plantas. La capacidad de desacoplar estos tiene una serie de ventajas que se discuten en el capítulo. 8 y parece conducir a tasas de crecimiento más altas (Goddek y Vermeulen 2018). Sin embargo, a pesar de los muchos avances, la tecnología real para lograr esto sigue siendo un desafío. Por ejemplo, algunas bacterias desnitrificantes heterotróficas cultivadas en anóxico o incluso aeróbico las condiciones con lodo de RAS utilizarán nitrato como receptor de electrones y fuentes de carbono oxidado para la energía, mientras se almacena el exceso de P como polifosfato junto con iones metálicos divalentes como Ca^{+2} o Cu^{+2}. Cuando estresado en pH alcalino, estas bacterias degradan el polifosfato y liberan ortofosfato, que es la forma necesaria para la asimilación de fosfato por las plantas (Van Rijn et al. 2006). La inserción de unidades de biorreactor de remineralización, como las de Goddek et al. (2018), podría proporcionar una forma de recuperar mejor P para hidroponía. Se han utilizado métodos similares, por ejemplo, con lodos de trucha de un RAS que fueron tratados por contenido de nitrato y P en exceso de los límites de eliminación permitidos (Goddek et al 2015). Sin embargo, las comunidades microbianas involucradas en estos procesos son sensibles a las condiciones de cultivo, tales como relaciones C:N, oxigenación, iones metálicos y pH, por lo que se pueden acumular nitritos y otros intermedios nocivos. A pesar de la vasta literatura sobre digestores de varios desechos orgánicos, principalmente anaeróbicos para la producción de biogás (Ibrahim et al.2016), hay mucha menos investigación sobre el tratamiento de desechos RAS (Van Rijn 2013), y en el

caso del sistema de acuaponia, aún menos investigación disponible sobre la relación entre la biodisponibilidad de nutrientes y el crecimiento de cultivos en el sistema hidropónico (Möller y Müller 2012). En este momento, más estudios de biorreactores de lodos RAS podrían proporcionar información importante sobre las condiciones de cultivo para las poblaciones microbianas que producen resultados favorables, por ejemplo, en la recuperación de P y su introducción en unidades hidropónicas. Uno de los desafíos actuales en los esfuerzos para evaluar la recuperación de P del lodo surge cuando se comparan ensayos de digestores anaeróbicos y aeróbicos para su eficacia (Goddek et al. 2016b; Monsees et al. 2017). Aunque ambos estudios utilizaron inicialmente una composición de lodo similar, los resultados fueron bastante diferentes. En un estudio (Monsees et al.2017), las medidas de varios nutrientes solubles en tratamientos aeróbicos dieron como resultado una 330% de aumento en la concentración de P y una disminución del 16% en la concentración de nitrato en comparación con aumentos menores en P y una disminución del 97% en nitrato en tratamientos anaeróbicos. Por el contrario, los resultados de un estudio similar (Goddek et al.2016b) mostraron que el crecimiento de las plantas de lechuga en una unidad hidropónica fue superior usando sobrenadante anaeróbico, a pesar de que los tratamientos anaeróbicos y aeróbicos solo dieron como resultado una recuperación de nitrato ligeramente mejor de las condiciones anaeróbicas y casi pérdida completa de PO4 de ambos tratamientos (Goddek et al. 2016b). Obviamente, factores como la composición y las tasas de alimentación, la suspensión versus la sedimentación de sólidos, pH (mantenido a 7 1 con CaOH2 en el primero y variable 8.2–8.65 en el segundo), las muestras y las cepas de peces diferían en estos dos estudios. Sin embargo, los resultados contrastantes para PO4 y NO3 indican la necesidad de más investigación para optimizar la recuperación de nutrientes, con la adición de un enfoque metagenómico para caracterizar las comunidades microbianas para comprender mejor su papel en estos procesos.

6.7 CONCLUSIONES

Anteriormente el dominio de los productores a pequeña escala, los avances tecnológicos están moviendo cada vez más la acuaponía hacia una producción comercial a mayor escala al enfocarse en la recuperación mejorada de macro y micronutrientes, al tiempo que proporcionan innovaciones técnicas para reducir los requisitos de agua y energía. Sin embargo, la ampliación de la acuaponia a escala industrial requiere una mejor comprensión y mantenimiento de los ensambles microbianos, y la implementación de medidas de biocontrol fuertes que favorezcan la salud y el bienestar de los peces y los cultivos, al mismo tiempo que se cumplen

los estándares de seguridad alimentaria para el consumo humano. Se necesita más investigación sobre el biocontrol de los patógenos microbianos en acuaponia, incluidos los posibles patógenos humanos, de peces y vegetales, a la luz de la sensibilidad de tales sistemas a la perturbación, y el hecho de que el uso de productos químicos y antibióticos puede tener profundos efectos en las poblaciones microbianas, fisiología de peces y plantas, así como la operación general del sistema. Elucidar las interacciones microbianas puede mejorar la productividad del sistema de acuaponía dado el papel crucial de los microbios en la conversión de materia orgánica en formas utilizables que pueden permitir que prosperen los peces y las plantas.

REFERENCIAS

Akhter N, Wu B, Memon AM, Mohsin M (2015) Probiotics and prebiotics associated with aquaculture: a review. Fish Shellfish Immunol 45:733–741

Anderson T, de Villiers D, Timmons M (2017a) Growth and tissue elemental composition response of butterhead lettuce (Lactuca sativa, cv. Flandria) to hydroponic and aquaponic conditions. Horticulturae 3:43

Anderson TS, Martini MR, de Villiers D, Timmons MB (2017b) Growth and tissue elemental composition response of Butterhead lettuce (Lactuca sativa, cv. Flandria) to hydroponic con- ditions at different pH and alkalinity. Horticulturae 3:41

Antaki ET, Jay-Russell M (2015) Potential zoonotic risks in aquaponics. IAFP, Portland

Attramadal KJK, Truong TMH, Bakke I, Skjermo J, Olsen Y, Vadstein O (2014) RAS and microbial maturation as tools for K-selection of microbial communities improve survival in cod larvae. Aquaculture 432:483–490

Attramadal KJ, Minniti G, Øie G, Kjørsvik E, Østensen M-A, Bakke I, Vadstein O (2016) Microbial maturation of intake water at different carrying capacities affects microbial control in rearing tanks for marine fish larvae. Aquaculture 457:68–72

Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet OJ, Newton RJ (2018) Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. Front Microbiol 9:8

Bayliss SC, Verner-Jeffreys DW, Bartie KL, Aanensen DM, Sheppard SK, Adams A, Feil EJ (2017) The promise of whole genome pathogen sequencing for the molecular epidemiology of emerging aquaculture pathogens. Front Microbiol 8:121

Becquer A, Trap J, Irshad U, Ali MA, Claude P (2014) From soil to plant, the

journey of P through trophic relationships and ectomycorrhizal association. Front Plant Sci 5:548
Blancheton J, Attramadal K, Michaud L, d'Orbcastel ER, Vadstein O (2013) Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquac Eng 53:30–39
Bouchet V, Huot H, Goldstein R (2008) Molecular genetic basis of ribotyping. Clin Microbiol Rev 21:262–273
Cerozi BD, Fitzsimmons K (2016a) The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. Bioresour Technol 219:778–781
Cerozi BD, Fitzsimmons K (2016b) Use of Bacillus spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. Sci Hortic 211:277–282
Chalmers GA (2004) Aquaponics and food safety. Lethbridge, Alberta
Crab R, Defoirdt T, Bossier P, Verstraete W (2012) Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. Aquaculture 356:351–356
da Rocha A, Biazzetti Filho M, Stech M, Paz da Silva R (2017) Lettuce production in aquaponic and biofloc systems with silver catfish Rhamdia quelen. Bol Inst Pesca 43:64
Dang STT, Dalsgaard A (2012) Escherichia coli contamination of fish raised in integrated pig-fish aquaculture systems in Vietnam. J Food Prot 75:1317–1319
Dessaux Y, Grandclément C, Faure D (2016) Engineering the rhizosphere. Trends Plant Sci 21:266–278
Elumalai SD, Shaw AM, Pattillo DA, Currey CJ, Rosentrater KA, Xie K (2017) Influence of UV treatment on the food safety status of a model aquaponics system. Water 9:27
Feng J, Li F, Zhou X, Xu C, Fang F (2016) Nutrient removal ability and economical benefit of a rice-fish co-culture system in aquaculture pond. Ecol Eng 94:315–319
Fox BK, Tamaru CS, Hollyer J, Castro LF, Fonseca JM, Jay-Russell M, Low T (2012) A preliminary study of microbial water quality related to food safety in recirculating aquaponic fish and vegetable production systems. College of Tropical Agriculture and Human Resources, Honolulu
Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143
Goddek S, Vermeulen T (2018) Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponics system. Aquac Int 26:1377. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H,

Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224
Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman KJ (2016a) Navigating towards decoupled aquaponics system: a system dynamics design approach. Water 8:303
Goddek S, Schmautz Z, Scott B, Delaide B, Keesman KJ, Wuertz S, Junge R (2016b) The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. Agronomy-Basel 6:37
Goddek S, Delaide BP, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LP (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19
Ibrahim MH, Quaik S, Ismail SA (2016) An introduction to anaerobic digestion of organic wastes, prospects of organic waste management and the significance of earthworms. Springer, Cham, pp 23–44
Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Haïssam Jijakli M (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182
Kim SK, Jang IK, Lim HJ (2017) Inland aquaponics system using biofloc technology. Google Patents
Knief C (2014) Analysis of plant microbe interactions in the era of next generation sequencing technologies. Front Plant Sci 5:216
Knief C, Delmotte N, Vorholt JA (2011) Bacterial adaptation to life in association with plants–a proteomic perspective from culture to in situ conditions. Proteomics 11:3086–3105
Lee S, Lee J (2015) Beneficial bacteria and fungi in hydroponics system: types and characteristics of hydroponic food production methods. Sci Hortic 195:206–215
Li G, Tao L, Li X-l, Peng L, Song C-f, Dai L-l, Wu Y-z, Xie L (2018) Design and performance of a novel rice hydroponic biofilter in a pond-scale aquaponic recirculating system. Ecol Eng 125:1–10
Martínez-Córdova LR, Emerenciano M, Miranda-Baeza A, Martínez-Porchas M (2015) Microbial- based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. Rev Aquac 7:131–148
Martínez-Porchas M, Vargas-Albores F (2017) Microbial metagenomics in aquaculture: a potential tool for a deeper insight into the activity. Rev Aquac 9:42–56
Massart S, Martinez-Medina M, Jijakli MH (2015) Biological control in the microbiome era: challenges and opportunities. Biol Control 89:98–108
Michaud L, Lo Giudice A, Troussellier M, Smedile F, Bruni V, Blancheton J-P (2009) Phylogenetic characterization of the heterotrophic bacterial communities inhabiting a marine recirculating aquaculture system. J Appl Microbiol 107:1935–1946
Möller K, Müller T (2012) Effects of anaerobic digestion on digestate

nutrient availability and crop growth: a review. Eng Life Sci 12:242–257
Monsees H, Keitel J, Paul M, Kloas W, Wuertz S (2017) Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. Aquac Environ Interact 9:9–18
Moriarty MJ, Semmens K, Bissonnette GK, Jaczynski J (2018) Inactivation with UV-radiation and internalization assessment of coliforms and Escherichia coli in aquaponically grown lettuce. LWT 89:624–630
Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, Ocampo-Velazquez RV, Garcia-Trejo JF, Guevara-Gonzalez RG (2015) Perspective for aquaponics system: "omic" technologies for microbial community analysis. Biomed Res Int 2015:480386
Oburger E, Schmidt H (2016) New methods to unravel rhizosphere processes. Trends Plant Sci 21:243–255
Orriss GD, Whitehead AJ (2000) Hazard analysis and critical control point (HACCP) as a part of an overall quality assurance system in international food trade. Food Control 11:345–351
Pantanella E, Cardarelli M, Di Mattia E, Colla G (2015) Aquaponics and food safety: effects of UV sterilization on total coliforms and lettuce production. In: Carlile WR (ed) International confer- ence and exhibition on soilless culture, pp 71–76
Pinho SM, Molinari D, de Mello GL, Fitzsimmons KM, Coelho Emerenciano MG (2017) Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. Ecol Eng 103:146–153
Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Thoman ES (2004) Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponics system. New dimensions on farmed tilapia. Proceedings from the 6th international symposium on tilapia in aquaculture 000, 1–15
Rurangwa E, Verdegem MC (2015) Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. Rev Aquac 7:117–130
Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits THM (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199:613–620
Schreier HJ, Mirzoyan N, Saito K (2010) Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. Curr Opin Biotechnol 21:318–325
Shafi J, Tian H, Ji M (2017) Bacillus species as versatile weapons for plant pathogens: a review. Biotechnol Equip 31:446–459
Sheridan C, Depuydt P, De Ro M, Petit C, Van Gysegem E, Delaere P, Dixon M, Stasiak M, Aciksöz SB, Frossard E (2017) Microbial community dynamics and response to plant growth- promoting microorganisms in

the rhizosphere of four common food crops cultivated in hydro- ponics. Microb Ecol 73:378–393

Siebielec G, Ukalska-Jaruga A, Kidd P (2014) Bioavailability of trace elements in soils amended with high-phosphate materials. In: Selim HM (ed) Phosphate in soils: interaction with micronutrients, radionuclides and heavy metals bioavailability of trace elements in soils amended with high-phosphate materials. CRC Press/Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp 237–268

Sirakov I, Lutz M, Graber A, Mathis A, Staykov Y, Smits TH, Junge R (2016) Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponics system. Water 8:518

Timmons MB, Ebeling JM (2013) Recirculating aquaculture. Ithaca Publishing Company, Ithaca. 788 p

Van Dam NM, Bouwmeester HJ (2016) Metabolomics in the rhizosphere: tapping into belowground chemical communication. Trends Plant Sci 21:256–265

Van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 53:49–56

Van Rijn J, Tal Y, Schreier HJ (2006) Denitrification in recirculating systems: theory and applica- tions. Aquac Eng 34:364–376

Vilbergsson B, Oddsson GV, Unnthorsson R (2016a) Taxonomy of means and ends in aquaculture production-part 3: the technical solutions of controlling n compounds, organic matter, p compounds, metals, temperature and preventing disease. Water 8:506

Vilbergsson B, Oddsson GV, Unnthorsson R (2016b) Taxonomy of means and ends in aquaculture production – Part 2: The technical solutions of controlling solids, dissolved gasses and pH. Water 8:387

Wielgosz ZJ, Anderson TS, Timmons MB (2017) Microbial effects on the production of aquaponically grown lettuce. Horticulturae 3:46

Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, Lee JW, Khanal SK (2017) Nitrogen transformations in aquaponics system: a review. Aquac Eng 76:9–19

Yildiz HY, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponics system: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. Water 9:13

Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. Water 8:589

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si

se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 7

SISTEMAS ACUAPÓNICOS ACOPLADOS

Harry W. Palm, Ulrich Knaus,
Samuel Appelbaum, Sebastian M. Strauch, and Benz Kotzen

Capítulo 7.
SISTEMAS ACUAPÓNICOS ACOPLADOS

Harry W. Palm, Ulrich Knaus, Samuel Appelbaum, Sebastian M. Strauch, and Benz Kotzen

Resumen

La acuaponía acoplada es la forma arquetípica de acuaponía. La complejidad técnica aumenta con la escala de producción y el tratamiento de agua requerido, por ejemplo, la filtración, la luz ultravioleta para control microbiano, la alimentación controlada automática, la computación y bioseguridad. El aumento de escala se realiza a través de sistemas de múltiples unidades que permiten la producción escalonada de peces, el cultivo paralelo de diferentes plantas y la aplicación de varios subsistemas hidropónicos. La tarea principal de la acuaponía acoplada es la purificación del agua del proceso de acuicultura a través de la integración de plantas que agregan beneficios económicos al seleccionar especies adecuadas como hierbas, plantas medicinales u ornamentales. Por lo tanto, la acuaponía acoplada con los sistemas cerrados de recirculación de agua tiene un papel particular que cumplir. Bajo recirculación completamente cerrada de agua enriquecida con nutrientes, la simbiótica de los peces, las plantas y la comunidad de bacterias pueden dar lugar a mayores rendimientos en comparación con la producción de peces y/o el cultivo de plantas independientes. Las opciones de peces y plantas son muy diversas y solo están limitadas por los parámetros de calidad del agua, fuertemente influenciados por los alimentos para peces, el área de cultivo de plantas y las proporciones de componentes que a menudo no son ideales. Las carpas, la tilapia

The original version of this chapter was revised: The correct DOI "https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.03.021" has been updated for author Palm et al. (2019) in references list on page 197. The correction to this chapter is available at https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_25

A. Joyce*
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Swede.
E-mail: alyssa.joyce@gu.se
M. Timmons
Biological & Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, USA.
E-mail: mbt3@cornell.edu
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
E-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
T. Pentz
Eat & Shine VOF, Velp, The Netherlands.
E-mail: timea.pentz@eatandshine.nl

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_7

y el pez gato se usan con mayor frecuencia, aunque se han aplicado especies de peces y cangrejos más sensibles. La poliposis y los fertilizantes adicionales son métodos para mejorar la calidad de la planta en el caso de deficiencias de crecimiento, aumentar la producción de la planta y aumentar el rendimiento total. Las principales ventajas de la acuaponía acoplada son el uso más eficiente de los recursos, como los alimentos para peces que son esenciales para el aporte de nutrientes, fósforo, agua y energía, así como el aumento del bienestar de los peces. El enfoque de diseño de sistemas multivariados permitió que la acuaponía acoplada se instale en todas las regiones geográficas, desde las altas latitudes hasta las regiones áridas y desérticas, con una adaptación específica a las condiciones ambientales locales. Este capítulo proporciona una visión general del desarrollo histórico, el diseño general del sistema, la ampliación de escala, los sistemas de agua salina y salobre, las opciones de peces y plantas, así como los problemas de gestión que presenta la acuaponía acoplada, especialmente en Europa.

Palabras clave: Acuaponía acoplada, Elección de peces y plantas, Ciclos de nutrientes, Sistemas polipónicos, Funciones

7.1 INTRODUCCIÓN

La combinación del cultivo de peces y plantas en acuaponía acoplada se remonta al primer diseño de Naegel (1977) en Alemania, utilizando un sistema de escala de hobby de 2000 L (Fig. 7.1) ubicado en un invernadero de ambiente controlado. Este sistema se desarrolló para verificar el uso de nutrientes del agua residual de peces en condiciones de recirculación de agua totalmente controladas destinadas a la producción de plantas, incluido un sistema de lodos doble (tratamiento de aguas residuales aeróbico / anaeróbico). Naegel basó su concepto en el sistema de acuaponía de estanque abierto de la Estación Experimental Agrícola de Carolina del Sur, en los EE. UU., Donde el exceso de nutrientes de los estanques, abastecidos con peces de canal (*Ictalurus punctatus*), fueron eliminados por la producción hidropónica de castañas de agua (*Eleocharis dulcis*) (Loyacano y Grosvenor 1973). Al incluir tanques de nitrificación y desnitrificación para aumentar la concentración de nitrato dentro de su sistema, Naegel (1977) intentó una oxidación completa de todos los compuestos nitrogenados, alcanzando concentraciones de nitrato de 1200 mg/ L y demostrando la efectividad del paso de nitrificación. Aunque el sistema se almacenó a baja densidad (20 kg/m³ cada uno) utilizando tilapia (*Tilapia mossambica*) y carpa (*Cyprinus carpio*), los tomates (*Lycopersicon esculentum*) y la lechuga iceberg (*Lactuca scariola*) crecieron bien y produjeron un rendimiento cosechable. Estos primeros resultados de la

investigación condujeron al concepto de sistemas acuapónicos acoplados, en el que las plantas eliminan los desechos producidos por los peces, creando un crecimiento adecuado, demostrando un uso de agua altamente eficiente en ambas unidades. El principio de acuaponía acoplada fue descrito por primera vez por Huy Tran en la Conferencia Mundial de Acuicultura en 2015 (Tran 2015).

Los sistemas de acuaponía acoplados no utilizan necesariamente el filtrado mecánico de partículas en el sentido clásico y mantienen un flujo de nutrientes constante entre la acuicultura y las unidades hidropónicas. El principal desafío es cómo manejar la carga fecal en el sistema acuapónico acoplado, donde las plantas absorben los nutrientes y los desechos de partículas se pueden eliminar del sistema mediante prensas de filtro o geotextiles. El desarrollo de la agricultura moderna, el crecimiento de la población humana y la reducción de los recursos en todo el mundo, ha promovido el desarrollo de sistemas acuapónicos acoplados. Dado que la piscicultura es considerablemente más eficiente en la producción de proteínas y el uso del agua en comparación con otros animales de granja y dado que los sistemas cerrados son en gran parte independientes del sitio, los sistemas acuapónicos acoplados han podido desarrollarse en todo el mundo (Graber y Junge 2009), en condiciones áridas (Kotzen y Appelbaum 2010 y Kotzen 2016) e incluso en entornos urbanos (König et al. 2016).

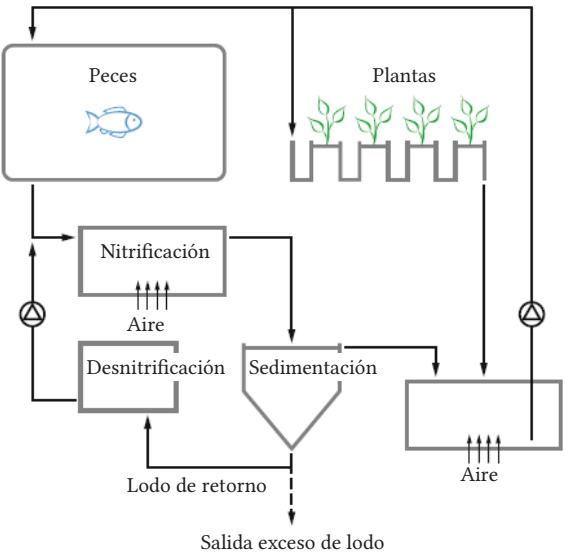


Fig. 7.1 Diagrama del primer sistema de Naegel (1977) cultivando tilapia y carpa común en combinación con lechuga y tomate en un sistema de recirculación cerrado.

La mayoría de los sistemas descritos pertenecen a instalaciones domésticas, a pequeña escala y semi-comerciales (Palm et al. 2018) que son impulsadas por aficionados, entusiastas o pequeñas empresas o emprendimientos. Los nuevos resultados de la investigación, resumidos en este capítulo, demuestran los potenciales y las limitaciones con respecto al desarrollo continuo de estos sistemas en acuaponía comercial, siendo capaces de hacer una contribución significativa a la producción futura de alimentos.

7.2 DESARROLLO HISTÓRICO DE ACUAPONÍA ACOPLADA

La mayoría de los esfuerzos de investigación originales sobre sistemas acuapónicos acoplados tuvieron lugar en los EE.UU. Con una presencia creciente en la UE, iniciada en parte por COST Action FA1305, el Centro de Acuaponía de la UE y en otros centros de investigación europeos. Hoy en día, completamente.

Los diseños de sistemas de acuaponía recirculante dominan casi por completo la industria de acuaponía estadounidense, con estimaciones de que más del 90% de los sistemas de acuaponía existentes en los EE.UU. tienen un diseño totalmente recirculante (Lennard, comunicación personal). La primera investigación estadounidense sobre acuaponía acoplada se llevó a cabo en el Centro de Pesca y Acuicultura de Illinois (anteriormente el Laboratorio Cooperativo de Investigación Pesquera de la SIU) y el Departamento de Zoología, centrándose en sistemas acuapónicos surtidos con peces de canal (*Ictalurus punctatus*) en combinación con tomates (*Lycopersicon esculentum*) (Lewis et al. 1978). Los autores señalaron que un crecimiento óptimo de la planta solo es posible cuando todos los macro y micronutrientes esenciales están disponibles en el agua de proceso, y por lo tanto se requiere suplementación de nutrientes en caso de deficiencias de nutrientes. Los autores también demostraron una deficiencia en el hierro disponible en la planta, lo que limita el crecimiento de la planta, que podría resolverse mediante la suplementación con quelato de hierro. Otros estudios iniciales en los EE. UU. Se centraron en analizar la funcionalidad tecnológica y la calidad de los peces y tomates de canal cosechados (Lewis et al. 1978; Sutton y Lewis 1982). Los sistemas de acuaponía a escala de laboratorio examinaron parámetros, como la eficiencia de los recursos con respecto a los materiales, los costos, el consumo de agua y energía, y examinaron el uso de otras especies de peces como *Tilapia* spp. en las Islas Vírgenes de los Estados Unidos (UVI) (Watten y Busch 1984). El Dr. James Rakocy, de la UVI, desarrolló el primer sistema de acuaponía acoplado comercial, un sistema de balsa que combinaba la producción de tilapia del nilo (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca*

sativa), y luego investigó la producción de otras especies de plantas (Rakocy 1989, 2012; Rakocy et al. 2000, 2003, 2004, 2006, 2011). Esta instalación comercial de mediana escala aprovechó el clima local donde los invernaderos no eran necesarios y las condiciones del mercado de las Islas Vírgenes eran adecuadas para generar ganancias. El sistema de acuaponía UVI se adoptó posteriormente en diferentes países con respecto a las necesidades de las diferentes plantas y la idoneidad de la tecnología, por ejemplo, en Canadá por Savidov (2005) y en Arabia Saudita por Al-Hafedh et al. (2008) Este es el caso también de Europa, donde los sistemas acuapónicos acoplados han evolucionado desde el diseño original de UVI, por ejemplo, el sistema de acuaponía vertical en el Laboratorio de Investigación de Acuaponía, Universidad de Greenwich (Khandaker y Kotzen 2018). Varios departamentos de investigación, investigaron la viabilidad tecnológica de la producción de acuaponía cerrada o "acoplada" utilizando diversas especies de peces y plantas, así como subsistemas hidropónicos para aumentar los rendimientos y reducir los diferentes parámetros de emisión (Graber y Junge 2009). Por ejemplo, en la Universidad de Rostock (Alemania), la investigación se centró en la estabilidad de los sistemas de traspatio (Palm et al. 2014a), combinando diferentes especies de peces, peces gato africano (*Clarias gariepinus*) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), con diferentes plantas (Palm et al.2014b, 2015). En 2015, se construyó un moderno sistema de acuaponía experimental a escala semi-comercial, el "FishGlassHouse", en el campus de la Universidad de Rostock (Palm et al. 2016). Sin embargo, el sistema fue diseñado permitiendo operaciones acopladas y desacopladas. Se construyeron otras instalaciones notables en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich (ZHAW) en Waedenswil en Suiza (Graber y Junge 2009; Graber et al.2014), instalaciones de investigación acopladas y desacopladas de la empresa islandesa Svinna-verkfraedi Ltd. (Thorarinsdottir 2014), el sistema de acuaponía de agua fría NIBIO Landvik en Grimstad (Skar et al.2015; Thorarinsdottir et al. 2015), el PAFF Box (Cultivo de plantas y peces Recuadro) un sistema de acuaponía de un bucle en la Universidad Gembloux Agro-Bio Tech de Lieja, en Gembloux, Bélgica (Delaide et al. 2017), el sistema combinado acuacultivo de pared viva y cultivo vertical en la Universidad de Greenwich (Khandaker y Kotzen 2018), así como el sistema de acuaponía acoplado de investigación doméstica (cambiado de desacoplado a acoplado en 2018, Morgenstern y Dapprich 2018, comunicación personal) en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Westfalia del Sur, Instituto i.GREEN de Tecnología Verde y Desarrollo Rural.

7.3 ACUAPONÍA ACOPLADA: DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA

El principio de la acuaponía acoplada combina tres clases de organismos: (1) organismos acuáticos, (2) bacterias y (3) plantas que se benefician mutuamente en una masa de agua cerrada y recirculada. El agua sirve como medio de transporte de nutrientes, principalmente de los desechos de los peces disueltos, que son convertidos en nutrientes para el crecimiento de las plantas por las bacterias. Estas bacterias (por ejemplo, *Nitrosomonas* spec., *Nitrobacter* spec.) oxidan el amonio a nitrito y finalmente a nitrato. Por lo tanto, es necesario que las bacterias reciban cantidades sustanciales de amonio y nitrito para estabilizar el crecimiento de la colonia y la cantidad de producción de nitrato. En consecuencia, en un sistema acuapónico acoplado, los volúmenes son críticamente importantes, i) la unidad de acuicultura siguiendo los principios de sistemas de acuicultura de recirculación (RAS), ii) el sustrato de crecimiento bacteriano y iii) el espacio para las unidades vegetales y la cantidad de plantas que se van a cultivar. En conjunto, forman la unidad de acuaponía (Fig. 7.2).

Los componentes biológico-químicos específicos del agua de proceso tienen especial importancia para los sistemas acuapónicos acoplados. Con los alimentos o partículas de pienso no consumidas, los residuos orgánicos de los peces y las bacterias del agua de proceso, una emulsión de nutrientes combinada con enzimas y bacterias digestivas favorece el crecimiento de los peces y las plantas. Está demostrado que, en comparación con los sistemas autónomos como la acuicultura (peces) y la hidroponía (plantas), el crecimiento de los organismos acuáticos y los cultivos en un sistema acuaponía acoplada puede ser similar o incluso superior. Rakocy (1989) describió un rendimiento ligeramente superior de la tilapia (*Tilapia nilotica*, 46,8 kg) en la acuaponía acoplada en contraste con el cultivo de peces independiente (41,6 kg) y un ligero aumento del rendimiento de la lechuga Bibb de verano (385,1 kg) en comparación con la producción hidropónica de hortalizas (380,1 kg). Knaus et al. (2018b) registraron que la acuaponía aumentó el crecimiento de la biomasa de *O. basilicum*, aparentemente debido a una mayor generación de hojas de las plantas (3550 hojas en acuaponía) en comparación con la hidroponía convencional (2393 hojas). Delaide et al. (2016) demostraron que los tratamientos acuapónicos e hidropónicos de la lechuga mostraban un crecimiento de las plantas similar crecimiento, mientras que el peso de los brotes de la solución acuapónica complementada con nutrientes tuvo el mejor rendimiento.

Observaciones similares han sido hechas por Goddek y Vermeulen (2018).

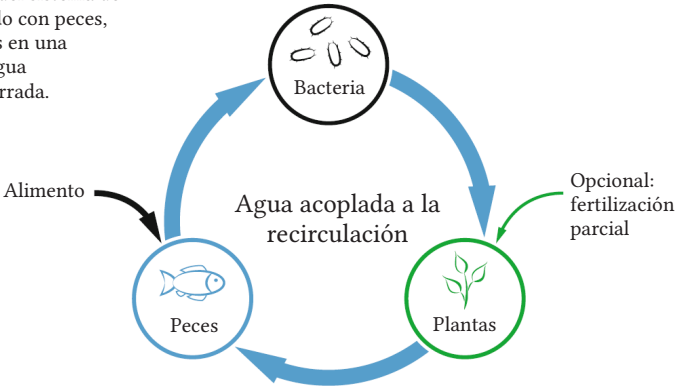


Fig. 7.2 Principio del sistema de acuaponía acoplado con peces, bacterias y plantas en una recirculación de agua completamente cerrada.

Lehmonen y Sireeni (2017) observaron un aumento en el peso de las raíces, el área de las hojas y el color de las hojas en la lechuga Batavia (*Lactuca sativa* var. Capitata) y la lechuga iceberg (*L. sativa*) con agua de proceso de acuaponía de *C. gariepinus* combinada con fertilizante adicional. Ciertas plantas como la lechuga (*Lactuca sativa*), los pepinos (*Cucumis sativus*) o los tomates (*Solanum lycopersicum*) pueden consumir nutrientes más rápido y, como resultado, florecen antes en acuaponía en comparación con la hidroponía (Savidov 2005). Además, Saha et al. (2016) reportaron un mayor rendimiento de biomasa vegetal en *O. basilicum* en combinación con cangrejos de río *Procambarus* spp. y una baja fertilización inicial del sistema acuapónico.

El diseño básico del sistema de acuaponía acoplada consiste en uno o más tanques de peces, una unidad de sedimentación o clarificador, sustratos para el crecimiento de bacterias o biofiltros adecuados y una unidad hidropónica para el crecimiento de las plantas (Fig.7.3). Estas unidades están conectadas por tuberías para formar un ciclo cerrado de agua. A menudo, después de la filtración mecánica y el biofiltro, se utiliza un sumidero de bomba (una bomba o un sistema de circuito) que, como el punto más profundo del sistema, bombea el agua de regreso a los tanques de peces desde donde fluye por gravedad hasta la unidad hidropónica.

Los sistemas acuapónicos acoplados se utilizan en diferentes escalas. El principio de circuito cerrado se puede usar en sistemas domésticos (mini/hobby/acoplados en el patio trasero), unidades de demostración (por ejemplo, Paredes vivas acopladas), acuaponía comercial y agricultura acuapónica (con suelo) que van desde pequeños/semi-comerciales hasta grandes a escala (Palm et al. 2018) Un desarrollo reciente en acuaponía ha incluido la fertilización parcial, que depende de la tolerancia de las especies

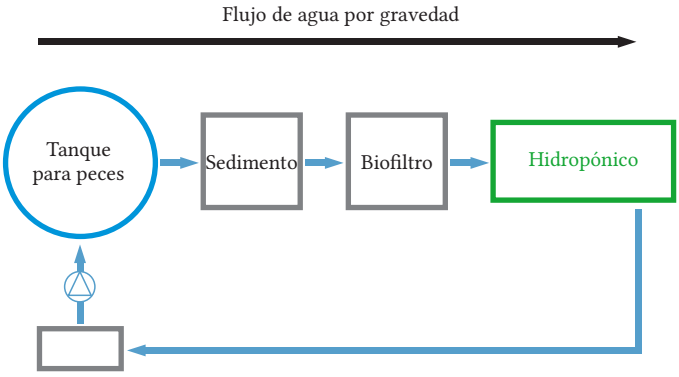


Fig. 7.3 Diseño técnico básico de un sistema acuapónico acoplado a un tanque para peces, sedimentador biofiltro, unidad hidropónica y un sumidero en el que el agua se bombea o se transporta por aire a los tanques de peces y fluye por gravedad a lo largo de los componentes.

de peces. Esto, sin embargo, puede resultar en un pico de nutrientes a corto plazo en el sistema, pero puede compensarse mediante la retención de nutrientes por parte de las plantas. En acuaponía acoplada, se debe lograr una proporción óptima del área de producción (o volúmenes de peces) de la unidad de acuicultura con la demanda de alimento resultante, así como una cantidad adecuada de plantas para cultivar en la unidad hidropónica (área de producción de plantas). (Para las discusiones sobre el papel de la evapotranspiración y la radiación solar dentro de los sistemas, véanse los capítulos 8 y 11). Para acuaponía de grava, Rakocy (2012) como primer intento sugirió "principios de relación de componentes", con un volumen de cría de peces de 1m³ de volumen de tanque de peces a 2m3 de medios hidropónicos de grava de guisantes de 3 a 6 cm como regla general. Finalmente, la cantidad de peces determina el rendimiento de los cultivos en acuaponía acoplada. Además, las condiciones técnicas de la unidad de cría de peces deben adaptarse según las necesidades de las especies acuáticas cultivadas.

7.4 UNIDAD DE ACUICULTURA

Los tanques de cría de peces (tamaño, números y diseño) se seleccionan según la escala de producción y las especies de peces en uso. Rakocy y col. (2006) utilizaron cuatro grandes tanques de cría de peces para la producción comercial de *O. niloticus* en el sistema de acuaponía UVI (EE.UU.). Con la producción de especies de peces omnívoros o piscívoros, como *C. gariepinus*, se deben usar varios tanques debido a la clasificación de las clases de tamaño y la producción escalonada (Palm et al. 2016). Los tanques de peces deben diseñarse de modo que los sólidos que se depositan

en el fondo de los tanques puedan eliminarse efectivamente a través de un efluente en el fondo. Esta eliminación de desechos sólidos es el primer paso crucial del tratamiento del agua en acuaponía acoplada, como es el caso de la acuicultura y la acuaponía desacoplada. Los desechos se originan a partir de alimentos no consumidos, heces de peces, biomasa bacteriana y efluentes producidos durante la producción acuícola, aumentando la DBO y reduciendo la calidad del agua y la disponibilidad de oxígeno con respecto tanto a la acuicultura como a las unidades hidropónicas. En la acuicultura, los desechos sólidos consisten en una gran parte de carbono orgánico, que es utilizado por las bacterias heterotróficas para producir energía a través del consumo de oxígeno. Cuanto mejor sea la eliminación de desechos sólidos, mejor será el rendimiento general del sistema tanto para peces como para plantas, es decir, con niveles óptimos de oxigenación y sin acumulación de partículas en la rizosfera que inhiban la absorción de nutrientes, y con tanques redondos u ovalados que demuestran ser particularmente eficientes (Knaus et al.2015). La producción de peces en acuaponía acoplada en FishGlassHouse en Alemania se probó a diferentes escalas para determinar la rentabilidad. Esto se realizó efectivamente como producción extensiva (máx. 50 kg, 35 peces m^3) o intensiva (máx. 200 kg, 140 peces m^3). La producción semi-intensiva (máx. 100 kg, 70 peces m^3) no se puede recomendar debido a un saldo negativo de costo-beneficio. En el modo de producción semi -intensivo, el mantenimiento del sistema, la mano de obra y el aporte de alimento fueron tanto como la producción intensiva pero con una producción reducida de peces y biomasa vegetal, y cualquier ganancia económica en la unidad de acuicultura no dio resultado (Palm et al.2017). Esto resultó de las altas demandas bioquímicas de oxígeno (DBO), la alta desnitrificación debido a la disponibilidad reducida de oxígeno, las tasas de intercambio de agua relativamente altas, la mineralización predominantemente anaeróbica con precipitaciones distintas, bajos niveles de P y K, así como bajos valores de pH con una producción de peces mucho menor en comparación con las condiciones intensivas. En contraste, la extensa producción de peces permitió una mayor disponibilidad de oxígeno con menores tasas de intercambio de agua y una mejor disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, bajo las condiciones anteriores, una unidad de producción de peces RAS para acuaponía acoplada, por lo tanto, funciona bajo condiciones de producción de peces extensas o intensivas, y deben evitarse las condiciones intermedias.

7.4.1 Filtración

Los clarificadores, a veces también llamados sedimentadores o separadores de remolinos (también ver Capítulo 3), son los dispositivos más utilizados

para la eliminación de desechos sólidos en acuaponía acoplada (Rakocy et al. 2006; Nelson y Pade 2007; Danaher et al. 2013, Fig. 7.4). Las partículas más grandes deben eliminarse del sistema para evitar zonas anóxicas con efectos desnitrificantes o el desarrollo de H_2S. La mayoría de los clarificadores usan insertos de láminas o placas para ayudar en la eliminación de sólidos. Los fondos cónicos soportan la concentración de lodo en el fondo durante la operación y la limpieza, mientras que los fondos planos requieren grandes cantidades de agua para enjuagarse y eliminar el lodo. Durante la operación, los sólidos se hunden hasta el fondo del clarificador para formar lodo. Dependiendo de la entrada de alimentación y el tiempo de retención, este lodo puede acumularse para formar capas relativamente gruesas. La actividad microbiana dentro de las capas de lodo se desplaza gradualmente hacia condiciones anaeróbicas, estimulando la desnitrificación microbiana. Este proceso reduce el nitrato disponible en la planta y debe evitarse, especialmente si el agua del proceso se va a utilizar para la producción de plantas hidropónicas. En consecuencia, la desnitrificación puede ser contraproducente en acuaponía acoplada. La densidad de los desechos sólidos eliminados por el clarificador es bastante baja, en comparación con otras tecnologías, el mantenimiento lleva mucho tiempo y la limpieza del clarificador con agua dulce es responsable de la pérdida principal de agua de todo el sistema. La cantidad requerida de agua se ve afectada por su diseño general, la forma del fondo y la accesibilidad de los bafles de PVC al agua de lavado (Fig. 7.4a, b). El aumento de las densidades de población de peces requiere mayores cantidades de intercambio de agua (todos los días de la semana en condiciones intensivas) para mantener la calidad óptima del agua para la producción de peces, lo que puede provocar la pérdida de grandes cantidades de agua de proceso, y también la pérdida de cantidades sustanciales de nutrientes necesarios para crecimiento de la planta. Además, el reemplazo con agua dulce introduce carbonatos de calcio y magnesio que luego pueden precipitar con fosfatos. Por lo tanto, el uso de tales clarificadores operados manualmente hace que las predicciones sobre la composición del agua del proceso con respecto al crecimiento óptimo de la planta sean casi imposibles (Palm et al. 2019). Sería más efectivo seguir El ejemplo de Naegle (1977) de separar el lodo aeróbico y anaeróbico y la descarga de nitrógeno gaseoso con un sistema de lodo dual.

Se puede lograr una eliminación más efectiva de desechos sólidos mediante filtros automáticos de tambor o disco que proporcionan barreras mecánicas que retienen los sólidos, que luego se eliminan mediante enjuague. Los nuevos desarrollos apuntan a reducir el uso de agua de enjuague a través de tecnologías de limpieza por aspiración, permitiendo la concentración de sólidos totales en el lodo hasta un 18% (Dr. Günther

Scheibe, PAL-Aquakultur GmbH, Alemania, comunicación personal, Fig. 7.4c).

Dicha eliminación efectiva de desechos tiene una influencia positiva en la composición del lodo, mejorando el control del agua efluente para cumplir mejor con los requisitos hortícolas. Otra opción es la aplicación de múltiples clarificadores (sedimentadores) o componentes de eliminación de lodos en una fila. Los biofiltros son otra parte esencial de RAS, ya que convierten el nitrógeno de amonio a través de oxidación microbiana a nitrato (nitrificación). Aunque las raíces de las plantas y el sistema en sí proporcionan superficies para las bacterias nitrificantes, la capacidad de controlar la calidad del agua es limitada. Los sistemas que no tienen biofiltración están restringidos a instalaciones mini o de pasatiempo con bajos insumos de alimentación. Tan pronto como aumenta la biomasa de peces y el aporte de alimento, se requiere una capacidad adicional de biofiltro para mantener una calidad de agua adecuada para el cultivo de peces y proporcionar cantidades suficientes de nitrato para el crecimiento de las plantas. Para acuaponía doméstica y de pequeña escala, los medios vegetales (grava o arcilla expandida, por ejemplo) pueden ser suficientes como biofiltros efectivos. Sin embargo, debido al alto potencial de obstrucción y, por lo tanto, al requisito de limpieza y mantenimiento

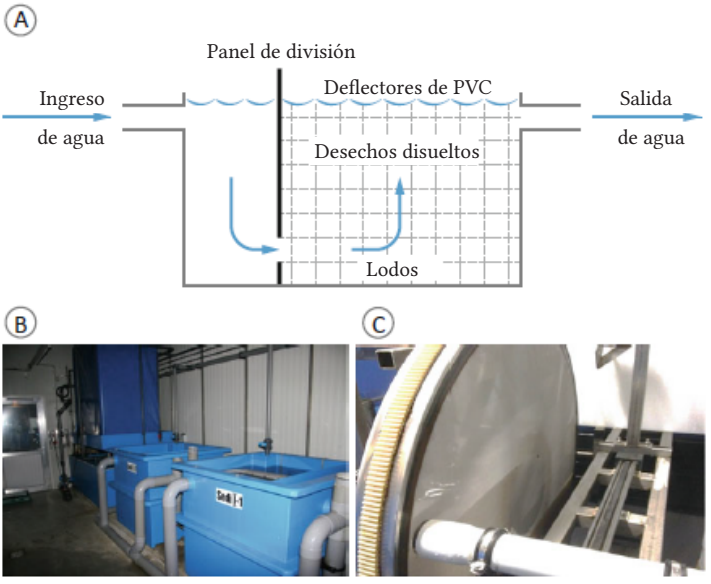


Fig. 7.4 Principio de filtración hidropónica con un sedimentador (a – b) y (c) filtro de disco (PAL-Aquakultur GmbH, Abtshagen, Alemania) de RAS comercial de peces gato africano (*Clarias gariepinus*) en el FishGlassHouse (Universidad de Rostock, Alemania).

manual regular, estos métodos no son adecuados para acuaponía comercial a gran escala (Palm et al.2018). Además, Knaus y Palm (2017a) demostraron que el uso de un biofiltro simple en una derivación ya aumentaba la posible entrada diaria de alimento en un sistema acuapónico acoplado en el patio en aproximadamente un 25%. Los biofiltros modernos que se usan en RAS intensivos son eficaces para proporcionar suficiente capacidad de nitrificación para la producción de peces y plantas. Debido al aumento de los costos de inversión, dichos componentes son más aplicables en sistemas acuapónicos comerciales de mediana y gran escala.

7.4.1.1 Hidroponía en acuaponía acoplada

En acuaponía acoplada, se puede utilizar una amplia gama de subsistemas hidropónicos (también ver Capítulo 4) dependiendo de la escala de operación (Palm et al.2018). A menos que la mano de obra no tenga un impacto significativo en el rendimiento (o el beneficio) y el sistema no sea demasiado grande, se pueden utilizar diferentes subsistemas hidropónicos al mismo tiempo. Esto es común en acuaponía doméstica y de demostración que a menudo usan sistemas de sustrato de lecho de medios (arena, grava, perlita, etc.) en canales de flujo y reflujo, canales DWC (cultivo en aguas profundas o sistemas de balsa) e incluso a menudo canales de película de nutrientes hechos a sí mismos. (NFT) La mayor parte del trabajo intensivo son los lechos de sustrato de los medios (arena/grava) en los canales de reflujo y flujo, que pueden obstruirse debido a la deposición de detritos y, a menudo, deben lavarse (Rakocy et al.2006). Debido al manejo de los sustratos, estos sistemas generalmente están limitados en talla. Por otro lado, los subsistemas hidropónicos de DWC requieren menos mano de obra y son menos propensos al mantenimiento, lo que les permite ser adoptados para áreas de plantación más grandes. Por esta razón, los subsistemas de DWC se encuentran principalmente en sistemas domésticos a pequeños/semi-comerciales, sin embargo, no generalmente en sistemas acuapónicos a gran escala. Para una producción acuapónica comercial más grande, la proporción de mano de obra y mantenimiento en el sistema DWC todavía se considera demasiado alta. Incluso el uso de los recursos hídricos y la energía para el bombeo también son desfavorables para los sistemas a gran escala.

Si los sistemas acuapónicos cerrados están diseñados para una producción orientada al beneficio, el uso de trabajo debe disminuir mientras que el área de producción debe aumentar. Esto solo es posible mediante la racionalización de la producción de peces combinada con la aplicación de subsistemas hidropónicos fáciles de usar. La técnica de la película de nutrientes (NFT) puede considerarse, en la actualidad, el sistema

hidropónico más eficiente, combinando poca mano de obra con grandes áreas de cultivo de plantas y una buena proporción de agua, energía y costos de inversión. Sin embargo, no todas las plantas de acuaponía crecen bien en sistemas NFT y, por lo tanto, es necesario encontrar la elección correcta de planta para cada subsistema hidropónico, lo que a su vez se correlaciona con el suministro de nutrientes de una especie de peces específica integrada en un diseño de subsistema hidropónico específico. Para acuaponía acoplada, la carga de partículas a veces mayor en el agua puede ser problemática al obstruir goteos, tuberías y válvulas en instalaciones NFT. Por lo tanto, los grandes sistemas de acuaponía deben contener una gestión profesional del agua con una filtración mecánica efectiva para evitar bloqueos de recirculación. Cuando se asegura el suministro continuo de agua a través de las tuberías, el sistema NFT se puede usar en todo tipo de sistemas acuapónicos acoplados, pero es más recomendable para la producción en sistemas pequeños/semi-comerciales y sistemas a gran escala (Palm et al.2018).

7.5 ESCALA DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS ACOPLADOS

Los sistemas de acuaponía acoplados típicos varían desde sistemas de pequeña a mediana escala y de mayor tamaño (Palm et al. 2018). El aumento de escala sigue siendo uno de los desafíos futuros porque requiere una prueba cuidadosa de las posibles combinaciones de peces y plantas. Se pueden repetir tamaños de unidades óptimos para formar sistemas de unidades múltiples, independientemente de la escala de producción. De acuerdo con Palm et al. (2018), la gama de sistemas acuapónicos se clasificó en (1) mini, (2) pasatiempo, (3) doméstico y en el patio trasero, (4) pequeños/semi-comerciales y (5) sistemas de gran escala (r), como descrito abajo: Las mini instalaciones (Fig. 7.5) generalmente consisten en un pequeño reservorio de peces como un pez en un tanque o acuario en el que las plantas crecen en la superficie o dentro de un pequeño lecho hidropónico. Usualmente se usan filtros de acuario convencionales, aireación y bombas. Los mini sistemas suelen tener un tamaño de 2m2 o menos (Palm et al.2018). Estos pequeños sistemas de acuaponía pueden usarse en el hogar con pocas plantas para el consumo doméstico y plantarse con plantas como tomates, hierbas u ornamentales. Dichos sistemas agregan nuevos valores al espacio vital humano al agregar la "naturaleza" al área de la vida familiar, que es especialmente popular en las grandes ciudades. Algunos mini sistemas consisten solo en un florero de planta y uno o más peces sin filtro ni bomba. Sin embargo, estos sistemas solo funcionan a corto plazo porque falta una filtración regulada. Los sistemas de acuaponía pasatiempo se clasifican para alcanzar un tamaño máximo de 10m2 (Palm et al.2018). Con una densidad de población de

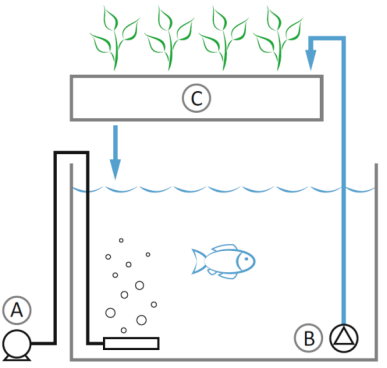


Fig. 7.5 Principio de un mini sistema acuapónico acoplado doméstico (<2 m², después de Palm et al. 2018) con aireación (a) una bomba (b), la hidroponía (c) actúa como un biofiltro

peces más alta, más alimentación y aireación, es necesaria una unidad de sedimentación mecánica (sedimentador/clarificador) (Fig. 7.6). El sedimentador elimina la materia particulada "fangos", como las heces y la alimentación no consumida del sistema sin usar energía.

El agua fluye por gravedad desde el tanque con los peces al sedimentador y luego a través de los tanques hidropónicos y luego cae en un sumidero desde donde una bomba o elevador de aire bombea el agua de regreso a los tanques con los peces. En las instalaciones de pasatiempos, los lechos de las plantas actúan como un filtro microbiano natural y, a menudo, se utilizan sustratos de lecho de medios tales como arena, grava fina o perlita. Los sistemas de acuaponía pasatiempo son más la categoría de trucos que no apuntan a la producción de alimentos. Prefieren disfrutar de la funcionalidad del sistema integrado. Los sistemas de pasatiempos, como su nombre lo indica, generalmente son instalados por aficionados que están interesados en cultivar una variedad de plantas y organismos acuáticos para su propio uso y para "diversión".

La acuaponía doméstica/de patio tiene el propósito de la producción de peces y plantas de uso doméstico externo caracterizada por tener un área de producción máxima de 50m² (Palm et al. 2018). Estos sistemas son

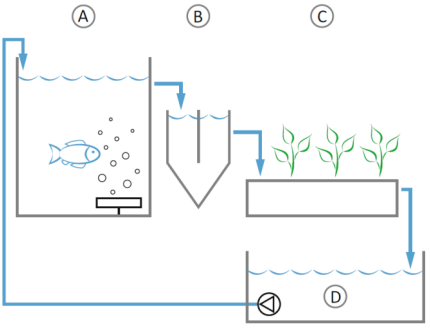


Fig 7.6 Principio de un sistema acuapónico doméstico acoplado (2–10 m2 después de Palm et al.2018) con (a) tanque de peces y aireación, (b) sedimentador o clarificador alterado después de Nelson y Pade (2007), © lecho hidropónico, p. grava con diferentes cultivos que actúa como un biofiltro y (d) un sumidero con la bomba

construidos por entusiastas. La construcción está técnicamente diferenciada con una mayor producción de peces, aireación adicional y una mayor entrada de alimento. El principio de acuaponía acoplada se aplica con el uso de una sola bomba que recircula el agua desde un sumidero (punto más bajo) a tanques de peces de pie más altos y luego por gravedad a través de un sedimentador y un biofiltro (con aireación y sustratos de bacterias) a las unidades hidropónicas Fig. 7.7). Para la biofiltración, los filtros de lecho convencionales también se pueden usar como se describe en Palm et al. (2014a, b, 2015). En la acuaponía del patio trasero, la hidroponía podría consistir sola o en conjunto en canales de balsa o DWC (cultivo en aguas profundas), subsistemas de sustrato tales como cajas de áspero / reflujo de grava / arena gruesa o canales de técnica de película de nutrientes (NFT).

En el hemisferio norte, en instalaciones exteriores, la producción se limita a los períodos de primavera, verano y principios de otoño debido a las condiciones climáticas. Con esta escala de operación, los peces y las plantas se pueden producir para consumo privado (y la producción se puede extender a través de una pequeña producción en invernadero), pero también es posible la venta directa en pequeñas cantidades.

Los sistemas de *acuaponía pequeña y semi-comercial* se caracterizan por tener hasta 100 m² (Palm et al. 2018) con una producción enfocada en el mercado minorista. Más tanques, a menudo con una mayor densidad de almacenamiento, filtros adicionales y tratamiento de agua. sistemas y un área hidropónica más grande con diseños más diversos caracterizan estos sistemas.

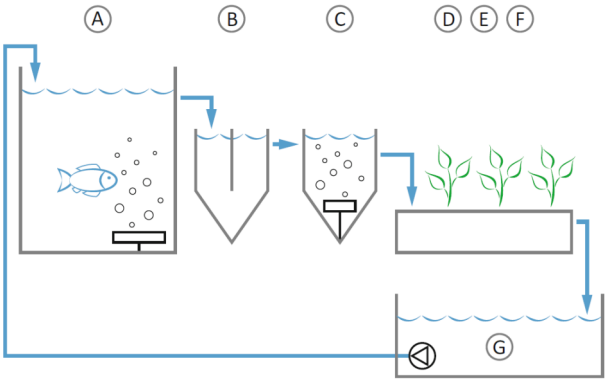


Fig. 7.7 Principio de un sistema de acuaponía doméstica de patio trasero acoplado, 10–50 m2 (de Palm et al. 2018) con (a) tanque de peces y aireación, (b) sedimentador o clarificador alterado después de Nelson y Pade (2007), (c) biofiltro con sustratos y aireación, (d) unidad hidropónica que podría consistir en canales combinados de balsa o DWC, (e) sistema de sustrato de grava o arena, (f) técnica de película de nutrientes NFT-canales y (g) un sumidero con una bomba.

Operaciones comerciales a gran escala (r) de más de 100 m2 (Palm et al. 2018) y abarcar muchos miles de metros cuadrados, alcanzan la mayor complejidad y requieren una planificación cuidadosa del flujo de agua y los sistemas de tratamiento (Fig. 7.8). Los componentes generales son tanques de peces múltiples, diseñados como sistemas intensivos de recirculación acuícola (RAS), un punto de transferencia de agua o un sumidero que permite el intercambio de agua entre los peces y las plantas, y las unidades de producción de plantas comerciales (acuaponía s.s./s.l.). Como la producción de peces está destinada a densidades intensivas de población, los componentes tales como la filtración adicional con la ayuda de filtros de tambor, suministro de oxígeno, tratamientos de luz UV para control microbiano, alimentación controlada automática e informatización, incluido el control automático de la calidad del agua, clasifican estos sistemas. Estos sistemas tienen un diseño de múltiples unidades capaces de aumentar la escala bajo una recirculación de agua totalmente cerrada que también permite la producción escalonada, el cultivo paralelo de diferentes plantas que requieren diferentes subsistemas hidropónicos y un mejor control de las diferentes unidades en caso de brote de enfermedades y control de plagas de plantas.

7.6 ACUAPONÍA DE AGUA SALINA/SALOBRE.

Un campo de investigación relativamente nuevo es la evaluación de diferentes salinidades del agua utilizada para el crecimiento de las plantas. Dado que el agua dulce en todo el mundo está en una demanda en continuo aumento y a precios altos, se ha prestado cierta atención al uso de recursos de agua salina/salobre para la agricultura, la acuicultura y también la acuaponía. El uso de agua salobre es significativo ya que muchos países como Israel tienen recursos de agua salobre subterránea, y más de la mitad del agua subterránea del mundo es salina. Mientras que la cantidad de agua salina subterránea solo se estima como 0,93% de los recursos hídricos totales del mundo en 12,870,000 km^3, esto es más que las reservas subterráneas de agua dulce (10,530,000 km^3), que representan el 30,1% de todas las reservas de agua dulce (USGS).

La primera investigación publicada sobre el uso de agua salobre en acuaponía se llevó a cabo en 2008-2009 en el desierto de Negev de Israel (Kotzen y Appelbaum 2010). Los autores estudiaron el potencial de acuaponía de agua salobre que podría utilizar los 200–300 mil millones de m^3 estimados ubicados a 550–1000 metros bajo tierra en la región. Este y otros estudios utilizaron hasta 4708–6800 µS/cm (4000–8000 µS/m = moderadamente salino, Kotzen y Appelbaum 2010; Appelbaum y Kotzen 2016) en sistemas acuapónicos acoplados con *Tilapia* sp. (cepa roja de

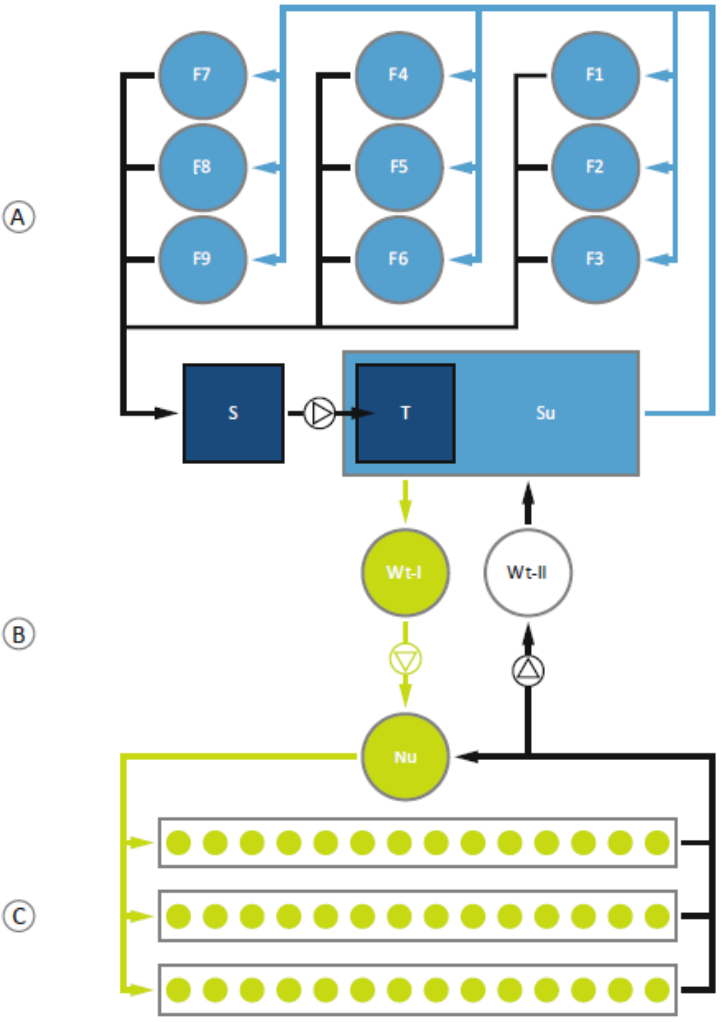


Fig. 7.8 Esquema (supervisión) de un módulo de acuaponía a gran escala adoptado después del FishGlassHouse en la Universidad de Rostock (Alemania) (área de producción total de 1000 m², Palm et al. 2018) con (a) unidad de acuicultura independiente, (b) el sistema de transferencia de agua y (c) la unidad hidropónica independiente; F1-F9 tanques de peces, S) sedimentador, P-I bomba uno (bomba de biofiltro), P-II bomba dos (bomba de recirculación de acuicultura), T) filtro de goteo, Su) sumidero. En el medio, sistema de transferencia de agua con nutrientes Wt-I) tanque de transferencia de agua de la unidad de acuicultura, P-III) bomba tres, que bombea el agua rica en nutrientes de la acuicultura a C) unidad hidropónica a la derecha con Nu) tanque de nutrientes y un sistema de recirculación hidropónica independiente y mesas de plantación (o NFT); P-IV) bomba cuatro, que bombea el agua baja en nutrientes de la unidad hidropónica de regreso al tanque de transferencia de agua Wt-II) y a la unidad de acuicultura para condiciones acuapónicas acopladas (o desacopladas si no se usan).

tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* x híbridos de tilapia azul *O. aureus*), combinada con sistemas de balsa flotante y grava de cultivo en aguas profundas. Los sistemas se reflejaron con sistemas de agua potable como control. Se cultivó una amplia gama de hierbas y vegetales, con resultados muy buenos y comparativos tanto en sistemas salobres como de agua dulce. En ambos sistemas, la salud y el crecimiento de los peces fueron tan buenos como el crecimiento de los puerros (*Allium ampeloprasum*), apio (*Apium graveolens*) (Fig. 7.9), colinabo (*Brassica oleracea* v. *Gongylodes*), repollo (*Brassica oleracea* v. *Capitata*), lechuga (*Lactuca sativa*), flor de cauli (*Brassica oleracea* v. *Botrytis*), acelga (*Beta vulgaris vulgaris*), cebolla tierna (*Allium fi stulosum*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y berro de agua (*Nasturtium officinale*) (Kotzen y Appelbaum 2010; Appelbaum y Kotzen 2016).

Un "informe de misión" de van der Heijden et al. (2014) sobre la integración de la agricultura y la acuicultura con agua salobre en Egipto sugiere que la tilapia roja (probablemente cepas rojas de *Oreochromis mossambicus*) tiene un alto potencial combinado con vegetales como guisantes, tomates y ajo que pueden tolerar una salinidad baja a moderada. Las plantas que se sabe que tienen tolerancia a la solución salina incluyen la familia del repollo (Brassicas), como repollo (*Brassica oleracea*), brócoli (*Brassica oleracea italica*), col rizada (*Brassica oleracea var. sabellica*), familia Beta, como *Beta vulgaris* (remolacha), espinacas perpetuas (*Beta vulgaris subsp. Vulgaris*) y pimientos (*Capsicum annuum*) y tomates (*Solanum lycopersicum*). Un candidato obvio para las plantas de acuaponía de agua salobre es el hinojo marino de pantano (*Salicornia europaea*) y potencialmente otros "vegetales de hebra" como la col rizada (*Crambe maritima*), el aster marino (*Tripolium pannonicum*) y el verdolaga (*Atriplex portulacoides*).

Fig. 7.9 Planta de apio madura cultivada en agua

Gunning (2016) señaló que, en las regiones más áridas, el cultivo de halófitas como alternativa a los cultivos convencionales está ganando una popularidad significativa y *Salicornia europea* se está volviendo cada vez más popular en los menús de restaurantes y en los mostradores de pescadores y salud. tiendas de alimentos en todo el país. Este es el caso similar en todo el Reino Unido y la UE, donde la mayoría de los productos se exportan desde Israel y ahora también desde Egipto. Una clara ventaja del cultivo de pantano de samphire es que es un cultivo de "cortar y volver", lo que significa que se puede cosechar a intervalos de alrededor de 1 mes. En su entorno natural a lo largo de los estuarios salinos, Salicornia europaea crece a lo largo de un gradiente salino desde salino hasta salobre (Davy et al. 2001). En ensayos de Gunning (2016), las plantas se cultivaron a partir de semillas, mientras que Kotzen cultivó sus plantas de prueba a partir de tallos cortados comprados en el mostrador de peces de supermercado. Otros estudios en condiciones salinas fueron realizados por Nozzi et al. (2016), quienes estudiaron los efectos de la infección por dinoflagelado (*Amyloodinum ocellatum*) en la lubina (*Dicentrarchus labrax*) a diferentes niveles de salinidad. Pantanella (2012) estudió el crecimiento de la halófita Salsola soda (col de sal) en combinación con el salmonete gris (*Mugil cephalus*) en condiciones marinas de aumento del contenido de sal en una granja experimental en la Universidad de Tuscia (Italia). Los recursos hídricos marinos también se han utilizado con éxito en acuaponía acoplada con la producción de lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) y plantas tolerantes a la sal (*halófitas*) como *Salicornia dolichostachya*, *Plantago coronopus* y *Tripolium pannonicum* en un sistema acuícola de recirculación marina (Waller. et al.2015).

7.7 OPCIONES DE PESCES Y PLANTAS

7.7.1 Producción de Peces

A mayor escala, la acuicultura comercial y la producción de plantas necesitan satisfacer las demandas del mercado. La producción de peces permite la variación de especies, de acuerdo con el diseño del sistema respectivo y los mercados locales. La elección de los peces también depende de su impacto en el sistema. Se puede evitar la problemática producción de peces acuícolas acoplados debido a concentraciones inadecuadas de nutrientes, que afectan negativamente la salud de los peces. Si los sistemas acuapónicos acoplados tienen proporciones equilibradas de peces a plantas, las plantas que limpian el agua absorberán los nutrientes tóxicos. Como la aceptación de sustancias tóxicas depende de la especie, la elección de especies de peces tiene una influencia decisiva en el éxito económico. Por lo tanto, es importante encontrar la

combinación y la relación correctas entre los peces y las plantas, especialmente de aquellas especies de peces con menos actividades contaminantes del agua y plantas con alta capacidad de retención de nutrientes. Los beneficios de tener una familia de peces particular en sistemas acuapónicos acoplados no se comprenden claramente con respecto a sus necesidades específicas en términos de calidad del agua y cargas de nutrientes aceptables. Naegel (1977) encontró que no hubo un impacto negativo notable en el crecimiento de los peces que su uso, tilapia (*Tilapia mossambica*) y carpa común (*Cyprinus carpio*). Lewis et al. También utilizaron el pez gato del canal (Ictalurus punctatus). (1978) y Sutton y Lewis (1982) en los Estados Unidos. Se demostró que la calidad del agua de acuaponía satisfizo fácilmente las demandas de las diferentes especies de peces, especialmente mediante el uso de especies de "fáciles de producir" como la tilapia azul (*Oreochromis aureus*, anteriormente *Sarotherodon aurea*) en Watten y Busch (1984); Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), que a menudo se usó en estudios con diferentes especies de plantas como especies de peces modelo (Rakocy 1989; Rakocy et al. 2003, 2004; Al-Hafedh et al. 2008; Rakocy 2012; Villarroel et al. 2011; Simeonidou y col. 2012; Palm y col. 2014a, 2014b; Diem y col. 2017); y también la cepa híbrida de tilapia-roja (*Oreochromis niloticus* x tilapia azul *O. aureus híbridos*), que se investigaron en ambientes áridos del desierto (Kotzen y Appelbaum 2010; Appelbaum y Kotzen 2016).

Ha habido una expansión en los tipos de especies de peces utilizados en acuaponía, al menos en Europa, que se basa en el uso de especies nativas, así como en aquellas que tienen una mayor aceptación del consumidor. Esto incluye el pez gato africano (*Clarias gariepinus*) que Palm et al. Creció con éxito en condiciones acuapónicas acopladas. (2014b), Knaus y Palm (2017a) y Baßmann et al. (2017) en el norte de Alemania. La ventaja de *C. gariepinus* es una mayor aceptación de los parámetros adversos del agua, como el amonio y el nitrato, así como no hay necesidad de suministro de oxígeno adicional debido a su especial fisiología de respiración de aire. Existe mejor descripción de las buenas tasas de crecimiento de *C. gariepinus* en condiciones de acuaponía acoplada desarrollada en Italia por Pantanella (2012) y en Malasia por Endut et al. (2009) Se puede esperar una expansión de la producción de peces africanos bajo acuaponía acoplada, debido a la producción y gestión sin problemas, la alta calidad del producto y la creciente demanda del mercado en muchas partes del mundo. En Europa, otras especies de peces con alto potencial de mercado y valor económico se han convertido recientemente en el foco de la producción acuapónica, con especial énfasis en especies piscívoras como la lucioperca europea "Zander" (Sander lucioperca). La producción de lucioperca, una especie de pesces que es relativamente sensible a los parámetros del agua,

se probó en Rumania en acuaponía acoplada. Blidariu y col. (2013a, b) mostraron niveles significativamente más altos de P2O5 (pentóxido de fósforo) y nitrato en lechuga (*Lactuca sativa*) usando lucioperca en comparación con la producción convencional, lo que sugiere que la producción de lucioperca en acuaponía acoplada es posible sin efectos negativos sobre el crecimiento de peces por toxicidad de nutrientes. Los Cyprinidae (Cypriniformes), como la carpa, se han usado comúnmente en acuaponía acoplada y, en general, han mostrado un mejor crecimiento con densidades reducidas de almacenamiento y tasas mínimas de flujo de agua del proceso acuapónico (uso eficiente del agua) durante los experimentos en India. La densidad de población óptima de la carpa koi (*Cyprinus carpio var. Koi*) estaba en 1.4 kg/m (Hussain et al. 2014), y el mejor aumento de peso y rendimiento de Beta vulgaris var. se encontró bengalensis (espinaca) con una tasa de flujo de agua de 1.5 L/min (Hussain et al. 2015). Se observó un buen crecimiento de los peces y el rendimiento de las plantas de espinacas de agua (*Ipomoea aquatica*) con un porcentaje máximo de eliminación de nutrientes (NO_3-N, PO_4-P y K) reportado a un caudal mínimo de agua de 0.8 L/min con carpa koi policultivada (*Cyprinus carpio* var. *koi*) y pez dorado (*Carassius auratus*) por Nuwansi et al. (2016). Es interesante notar que el crecimiento de las plantas y la eliminación de nutrientes en la producción de koi (*Cyprinus carpio* var. *koi*) y pez dorado (*Carassius auratus*) (Hussain et al. 2014, 2015) con *Beta vulgaris* var. *La bengalensis* (espinaca) y la espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) aumentaron linealmente con una disminución en el flujo de agua del proceso entre 0,8 L/min y 1,5 L/min. Estos resultados sugieren que para el cultivo de peces ciprínidos, se recomienda disminuir el flujo de agua ya que esto no tiene impactos negativos en el crecimiento de los peces. En contraste, sin embargo, Shete et al. (2016) describieron una tasa de flujo más alta de 500 L/h (aproximadamente 8 L/min) para la producción común de carpa y menta (*Mentha arvensis*), lo que indica la necesidad de diferentes tasas de flujo de agua para diferentes especies de plantas. Otro ciprínido, la tenca (*Tinca tinca*), fue probado con éxito por Lobillo et al. (2014) en España y mostró altas tasas de supervivencia de peces (99.32%) a bajas densidades de población 0,68 kg/m³ sin dispositivos de eliminación de sólidos y buenas tasas de supervivencia de lechuga (98%). En general, los miembros de la familia Cyprinidae contribuyen en gran medida a la producción acuícola mundial (FAO 2017); Lo más probable es que esto también sea cierto en condiciones de acuaponía y productividad, pero la situación económica debe ser probada para cada país por separado.

Otros organismos acuáticos como el camarón y el cangrejo de río se han introducido en la producción de acuaponía acoplada. Mariscal-Lagarda y col. (2012) investigaron la influencia del agua de proceso del camarón

blanco (*Litopenaeus vannamei*) en el crecimiento de los tomates (*Lycopersicon esculentum*) y encontraron buenos rendimientos en acuaponía con un doble efecto de ahorro de agua bajo producción integrada. Otro estudio comparó la producción acuapónica semiintensiva combinada de langostinos de agua dulce (*Macrobrachium rosenbergii* - el camarón de Malasia) con albahaca (*Ocimum basilicum*) versus el cultivo tradicional de plantas hidropónicas con una solución nutritiva (Ronzón-Ortega et al. 2012). Sin embargo, la producción de albahaca en acuaponía fue inicialmente menos efectiva (25% de supervivencia), pero al aumentar la biomasa de las gambas, la biomasa de las plantas también aumentó, por lo que los autores llegaron a una conclusión positiva con la producción de albahaca con *M. rosenbergii*. Sace y Fitzsimmons (2013) informaron un mejor crecimiento de la planta en lechuga (*Lactuca sativa*), col china (*Brassica rapa pekinensis*) y pakchoi (*Brassica rapa*) con *M. rosenbergii* en policultivo con tilapia del Nilo (*O. niloticus*). El cultivo con langostinos estabilizó el sistema en términos de los parámetros químico-físicos, lo que a su vez mejoró el crecimiento de las plantas, aunque debido a un mayor pH, se produjeron deficiencias de nutrientes en la col y la lechuga chinas. En general, estos estudios demuestran que la producción de camarones en condiciones acuapónicas es posible e incluso puede ejercer un efecto estabilizador en el circuito cerrado o principio acuapónico acoplado.

7.7.2 Producción Vegetal

El cultivo de muchas especies de plantas, hierbas, cultivos fructíferos y vegetales de hoja se ha descrito en acuaponía acoplada. En muchos casos, el contenido de nutrientes del agua del proceso de acuaponía fue suficiente para un buen crecimiento de las plantas. Una revisión por Thorarinsdottir y col. (2015) resumen la información sobre la producción de plantas en condiciones de producción acuapónica de varias fuentes. La lechuga (*Lactuca sativa*) era la principal planta cultivada en acuaponía y a menudo se usaba en diferentes variaciones como la lechuga crujiente (iceberg), la lechuga mantecosa (bibb en los EE. UU.), La lechuga romana y la lechuga de hojas sueltas, en T° baja en la noche (3– 12 C) y temperaturas diurnas más altas (17–28 C) (Somerville et al. 2014). Muchos experimentos se llevaron a cabo con lechuga en acuaponía (por ejemplo, Rakocy 1989) o como una comparación del crecimiento de lechuga entre acuaponía, hidroponía y acuaponía complementada (Delaide et al. 2016). La lechuga romana (*Lactuca sativa longifolia* cv. Jericho) también fue investigada por Seawright et al. (1998) con buenos resultados de crecimiento similares a los hidropónicos independientes y una acumulación creciente de K, Mg, Mn, P, Na y Zn con biomasa creciente de peces de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*). Las concentraciones de Fe y Cu no se vieron afectadas. El

rendimiento de lechuga fue insignificante con diferentes densidades de población de peces (151 g, 377 g, 902 g, 1804 g) y biomasa vegetal entre 3040 g (151 g peces) y 3780 g (902 g peces). También se cultivaron lechugas, por ejemplo, por Lennard y Leonard (2006) con el bacalao de Murray (*Maccullochella peelii peelii*), y por Lorena et al. (2008) con el esturión "bester" (híbrido de hembra Huso: huso y macho *Acipenser ruthenus*) y por Pantanella (2012) con tilapia del Nilo (*O. niloticus*). Como cultivo de aguas cálidas, la albahaca (*Ocimum basilicum*) se informó como una buena hierba para el cultivo bajo acuaponía acoplada y el 81% de los encuestados informó que es el cultivo más plantado en los resultados de una encuesta internacional (Love et al.2015). Rakocy y col. (2003) investigaron la albahaca con rendimientos comparables en lotes y producción escalonada (2.0; 1.8 kg /m²) en contraste con el cultivo de campo con un Activamente bajo rendimiento (0.6 kg /m2). Somerville y col. (2014) describieron a la albahaca como una de las hierbas más populares para acuaponía, especialmente en sistemas a gran escala debido a su crecimiento relativamente rápido y su buen valor económico. Se pueden cultivar diferentes variedades de albahaca a temperaturas más altas entre 20 y 25 C en camas de medios, NFT (técnica de película de nutrientes) y sistemas hidropónicos DWC (cultivo en aguas profundas). La albahaca cultivada en lechos de grava puede alcanzar un rendimiento 2.5 veces mayor combinado con juveniles de tilapia (*O. niloticus*, 0.30 g) en contraste con *C. gariepinus* (0.12 g) (Knaus y Palm 2017a).

Los tomates (*Lycopersicon esculentum*) fueron descritos por Somerville et al. (2014) como un "excelente vegetal fructífero de verano" en acuaponía y puede hacer frente a la exposición total al sol y a temperaturas inferiores a 40 C, según el tipo de tomate. Sin embargo, la sostenibilidad económica en acuaponía acoplada se discute debido a la competitividad reducida de la producción de tomate acuapónico en comparación con la producción hidropónica convencional de alta ingeniería en invernaderos, en el Centro de mejora de los Países Bajos de DLV GreenQ en Bleiswijk con un rendimiento de tomate de 100,6 kg/m2 (Hortidaily 2015), o incluso más (Heuvelink 2018). Las investigaciones anteriores se centraron en el cultivo de esta planta en comparación con la producción de campo. Lewis y col. (1978) reportaron casi el doble de la cosecha de tomates bajo acuaponía en comparación con la producción de campo y la deficiencia de hierro que se produjo fue fijada usando ácido etilendiaminotetraacético. Los tomates también fueron producidos en diferentes sistemas acuapónicos en las últimas décadas, por Sutton y Lewis (1982) con buenos rendimientos de plantas a temperaturas de agua de hasta 28 ℃ combinados con el pez gato de canal (*Ictalurus punctatus*), por Watten y Busch (1984) combinados con tilapia (*Sarotherodon aurea*) y un rendimiento de fruta de tomate

comercializable total calculado de 9.6 kg / m², aproximadamente el 20% de los rendimientos registrados para acuaponía desacoplada (47 kg/m2 /y, Geelen 2016). McMurtry y col. (1993) tilapia híbrida combinada (*Oreochromis mossambicus* x *Oreochromis niloticus*) con tomates en biofiltros de arena asociados que mostraron un óptimo "rendimiento de la planta/alto rendimiento total de la planta" de 1:1.5 relación tanque/biofiltro (lecho de filtro de arena) y McMurtry et al. (1997) con un aumento en el rendimiento total del fruto de la planta con una relación creciente de biofiltro/tanque. Debe señalarse que la producción de tomates es posible bajo acuaponía acoplada. Siguiendo el principio del cultivo de plantas sin suelo en acuaponía, sensu stricto después de Palm et al. (2018), es ventajoso fertilizar parcialmente ciertos nutrientes como el fósforo, el potasio o el magnesio para aumentar los rendimientos (ver desafíos a continuación).

El cultivo de otras especies de plantas también es posible y la prueba de nuevos cultivos es continuamente siendo reportado. En el Reino Unido, Kotzen y Khandaker han probado vegetales exóticos asiáticos, con particular éxito con la calabaza amarga, también conocida como kerala o melón amargo (*Momordica charantia*) (Kotzen comunicación personal). El taro (*Colocasia esculenta*) es otra especie que se cultiva fácilmente con éxito informado tanto por sus grandes hojas de "oreja de elefante" como por sus raíces (Kotzen com. Pers.). Somerville y col. (2014) señalaron que los cultivos como la flor de cauli, berenjenas, pimientos, frijoles, guisantes, repollo, brócoli, acelgas y perejil tienen el potencial de cultivo bajo acuaponía. Pero hay muchos más (por ejemplo, apio, brócoli, colinabo, chiles, etc.), incluidas las plantas que prefieren tener las raíces húmedas, como la espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) y la menta (*Menta* spp.), Así como algunas plantas halófitas, como pantano samphire (*Salicornia europaea*).

Las plantas ornamentales también se pueden cultivar, solas o junto con otros cultivos (cultivos intercalados), Por ejemplo, *Hedera helix* (hiedra común) cultivada en la Universidad de Rostock por Palm & Knaus en un sistema acuapónico acoplado. Los ensayos utilizaron un 50% menos de nutrientes que normalmente se proporcionarían a las plantas en condiciones normales de vivero con un 94,3% de tasa de éxito (Fig. 7.10).

Además de la planta y la variante elegidas, existen dos obstáculos principales que conciernen a la producción de plantas en acuaponía en los dos estados sugeridos de producción de peces, extensiva e intensiva. En condiciones extensivas, la disponibilidad de nutrientes dentro del agua de proceso es mucho menor que en la producción de plantas comerciales, los nutrientes como K, P y Fe son deficientes, y

Fig. 7.10 Tres categorías de hiedra de calidad (Hedera helix), cultivadas en un sistema acuapónico acoplado que indica la calidad que requiere el comercio de viveros (a) muy buena y directamente comercializable, (b) buena y comercializable y (c) no lo suficientemente alta calidad.

la conductividad es entre 1000 y 1500 µS/cm, que es mucho menor que la aplicada en condiciones normales. Producción hidropónica de plantas comerciales regularmente entre 3000 y 4000 µS/cm. Las plantas que son deficientes en algunos nutrientes pueden mostrar signos de necrosis de las hojas y tienen menos clorofila en comparación con Plantas óptimamente fertilizadas. En consecuencia, la adición selectiva de algunos nutrientes aumenta la calidad de la planta que se requiere para producir productos competitivos.

En conclusión, la producción comercial de plantas de acuaponía acoplada bajo producción intensiva de peces tiene la dificultad de competir con la producción regular de plantas y la hidroponía comercial a gran escala. Lo no óptimo y según Palm et al. (2019) la composición impredecible de nutrientes causada por el proceso de producción de peces debe competir contra las condiciones óptimas de nutrientes que se encuentran en los sistemas hidropónicos. No hay duda de que es necesario desarrollar soluciones que permitan un crecimiento óptimo de las plantas y al mismo tiempo proporcionar la calidad del agua requerida para los peces.

7.7.3 Opciones de combinación de peces y plantas

La combinación de peces y plantas en acuaponía cerrada puede generar un mejor crecimiento de las plantas (Knaus et al. 2018b) combinado con beneficios para el bienestar de los peces (Baßmann et al. 2017). Dentro del agua del proceso, pueden ocurrir grandes variaciones en micronutrientes y

macronutrientes con efectos negativos en las necesidades nutricionales de las plantas (Palm et al.2019). Un análisis general de los sistemas de acuaponía acoplada ha demostrado que hay niveles bajos de nutrientes dentro de los sistemas (Bittsanszky et al.2016) en comparación con las soluciones de nutrientes hidropónicos (Edaroyati et al.2017). Las plantas no toleran un suministro insuficiente o excesivo de nutrientes sin efectos sobre el crecimiento y la calidad, y el aporte diario de alimento del sistema acuapónico debe ajustarse a las necesidades de nutrientes de la planta. Esto se puede lograr regulando la densidad de población de los peces, así como alterando la alimentación de los peces. Somerville y col. (2014) clasificaron las plantas en acuaponía de acuerdo con sus requerimientos de nutrientes de la siguiente manera:

1. Plantas con bajos requerimientos de nutrientes (por ejemplo, albahaca, *Ocimum basilicum*)
2. Plantas con requisitos nutricionales medios (por ejemplo, flor de cauli, *Brassica oleracea var. Botrytis*)
3. Plantas con altos requerimientos de nutrientes como especies fructíferas (por ejemplo, fresas, *Fragaria* spec.).

No todas las plantas pueden cultivarse en todos los subsistemas hidropónicos con el mismo rendimiento. La elección de la planta depende del subsistema hidropónico si se usan sistemas acuapónicos sin suelo convencionales (por ejemplo, DWC, NFT, reflujo y flujo; acuaponía sensu stricto '- *s.s.* - en sentido estricto). Bajo la agricultura de acuaponía ('acuaponía sensu lato' - *s.l.* - en un sentido más amplio, Palm et al.2018), el uso de suelo inerte o con la adición de fertilizantes aplica técnicas de jardinería de la horticultura, aumentando la gama posible de especies. En condiciones hidropónicas, las estructuras componentes de los subsistemas tienen una influencia decisiva en los parámetros de crecimiento de las plantas. De acuerdo con Love et al. (2015), la mayoría de los productores de acuaponía utilizaron sistemas de cama de balsa y media y, en menor cantidad, NFT y torres verticales. Lennard y Leonard (2006) estudiaron el crecimiento de la lechuga de roble verde (*Lactuca sativa*) y registraron la relación Lecho de grava > Balsa flotante > NFT en términos de desarrollo de biomasa y rendimiento en combinación con el bacalao de Murray (*Maccullochella peelii peelii*) en Australia.

Knaus & Palm (2016–2017, datos no publicados) han probado diferentes subsistemas hidropónicos como NFT, balsa flotante y sustrato de grava en el crecimiento de diferentes plantas en FishGlassHouse en un diseño experimental acuapónico desacoplado, que requiere pruebas posteriores en condiciones acopladas. Con la creciente densidad de producción de

bagre africano (*C. gariepinus,* aprox. 20–168 kg/m^3), la mayoría de los cultivos como el pepino (*Cucumis sativus*), albahaca (*Ocimum basilicum*) y pakchoi (*Brassica rapa chinensis*) tendieron a crecer mejor, en contraste con Lennard y Leonard (2006), en gravilla y acuaponía NFT (GRAVEL > NFT > RAFT; Wermter 2016; Pribbernow 2016; Lorenzen 2017) y la menta marroquí 'menta verde' (*Mentha spicata*) mostraron un rendimiento de crecimiento opuesto (RAFT = NFT> GRAVEL) con el mayor número de hojas en NFT (Zimmermann 2017). Esto demuestra una ventaja de las condiciones de grava y puede usarse de manera figurativa también en macetas de plantas convencionales con sustrato de suelo en condiciones acuapónicas acopladas. Este tipo de acuaponía fue designado como 'Horticultura - acuaponía *(s.l.)*' debido al uso de sustratos del sector hortícola (suelo, fibra de coco, turba, etc.) (ver Palm et al. 2018). Esto implica todas las técnicas de cultivo de plantas que permiten que las plantas crezcan en macetas, por lo que el sustrato en la maceta en sí puede considerarse equivalente a un sustrato de grava clásico para acuaponía. La investigación realizada por Knaus & Palm (datos no publicados) mostró variaciones en la calidad de los vegetales comúnmente cultivados y, por lo tanto, su idoneidad para crecer en este tipo de acuaponía con suelo (Fig. 7.11, Tabla 7.1). En este tipo de acuaponía, los frijoles, la lechuga y el rábano corrieron bien.

La elección de la planta (especie y cepa) y especialmente el subsistema y/o sustrato hidropónico, incluida la turba, los sustitutos de turba, la fibra de coco, el compost, la arcilla, etc. o una mezcla de ellos (ver Somerville et al. 2014), tiene un significativo impacto en el éxito económico de la empresa. La eficiencia de algunos sustratos debe ser probada en subunidades hidropónicas del lecho de medios (por ejemplo, el uso de arena (McMurtry et al. 1990, 1997), grava (Lennard y Leonard 2004) y perlita (Tyson et al. 2008). El uso de otros sustratos de lecho de medios como gravas volcánicas o rocas (toba / toba), grava de piedra caliza, grava de lecho de río, piedra pómez, plásticos reciclados, sustratos orgánicos como fibra de coco, aserrín, turba y tronco de arroz han sido descritos por Somerville y col. (2014) Sin embargo, los estudios comparativos cualitativos con recomendaciones son muy raros y están sujetos a investigaciones futuras.

7.7.4 Poliponica

La combinación de diferentes organismos acuáticos en un solo sistema acuapónico puede aumentar los rendimientos totales. Aplicado por primera vez por Naegel (1977), este principio de producción multiespecies fue acuñado del término policultivo combinado con acuaponía en sistemas acoplados como 'polyponic' (polyculture + aquaponics) de Knaus y Palm

Fig. 7.11 Experimentos con una variedad de vegetales comúnmente cultivados, en condiciones invernales 2016/2017 en FishGlassHouse (Universidad de Rostock, Alemania).

Tabla 7.1 Recomendación para el uso de plantas de jardinería en agricultura acuapónica con el uso de 50% del fertilizante regular en macetas con tierra.

Nombre	Lat. Nombre	Viabilidad en acuaponía	Marca	Régimen de nutrientes
Frijol	*Phaseolus vulgaris*	Si	1	Extensiva
Arveja	*Pisum sativum*	No	2	Intensiva
Remolacha	*Beta vulgaris*	No	2	Ambas
Tomates	*Solanum lycopersicum*	No	2,3	Ambas
Lechuga de hoja	*Valerianella locusta*	Si	1	Ambas
Rabano	*Raphanus sativus*	Si	1	Ambas
Trigo	*Triticum aestivum*	No	2	Ambas
Lechuga	*Lactuca sativa*	Si	1	Intensiva

(2017b). Al igual que IMTA (acuicultura multitrófica integrada), la poliposis expande la diversidad de los sistemas de producción. El uso de múltiples especies en un sistema tiene ventajas y desventajas, ya que (a) la diversificación permite al productor responder a las demandas del mercado local, pero (b) por otro lado, el enfoque se extiende a varios productos, lo que requiere una mayor habilidad y una mejor gestión. La información publicada sobre la poliponía es escasa. Sin embargo, Sace y Fitzsimmons (2013) informaron un mejor crecimiento de las plantas de lechuga, col china y pakchoi en policultivo con camarones de agua dulce (*Macrobrachium rosenbergii*) y tilapia del Nilo (*O. niloticus*) en acuaponía acoplada. Alberts-Hubatsch y col. (2017) describieron el cultivo de cangrejo de río noble (*Astacus astacus*), bajo rayado híbrido (*Morone saxatilis* x *M. chrysops*), microalgas (*Nannochloropsis limnetica*) y berro (*Nasturtium officinale*), donde el crecimiento del cangrejo de río fue mayor de lo esperado, alimentándose de raíces de berros, heces de los peces y una

dieta diseñada con lucioperca.

Las investigaciones iniciales en la Universidad de Rostock mostraron diferencias en el crecimiento de las plantas en dos unidades hidropónicas idénticas de 25 m^2 acopladas al patio trasero con la producción de bagre africano (*Clarias gariepinus*) y tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, Palm et al. 2014b). Los rendimientos de las plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) y frutos de pepino (*Cucumis sativus*) fueron significativamente mejores en combinación con *O. niloticus*. Este efecto también fue visto por Knaus y Palm (2017a) con un rendimiento 2.5 veces mayor en albahaca (*Ocimum basilicum*) y dos veces más biomasa de perejil (*Petroselinum crispum*) combinado con *O. niloticus*. Sin embargo, otra comparación entre *O. niloticus* y la carpa común (*Cyprinus carpio*) mostró una biomasa bruta doble por planta (g/planta) de tomates (*Solanum lycopersicum*) con tilapia y una biomasa bruta ligeramente aumentada de pepinos (*Cucumis sativus*) con carpa, con mayor peso del fruto de pepino en la unidad de acuaponía de *O. niloticus* (Knaus y Palm 2017b). El rendimiento de la menta (*Mentha x piperita*) fue aproximadamente 1.8 veces mayor en la unidad de tilapia, pero el perejil fue 2.4 veces mayor combinado con la carpa (Knaus et al. 2018a). Los resultados de estos experimentos siguieron el orden de crecimiento de las plantas: *O. niloticus*> *C. carpio*> *C. gariepinus*, mientras que el crecimiento de los peces mostró un orden inverso con: *C. gariepinus*> *O. niloticus*> *C. carpio*.

De acuerdo con estos resultados, la elección de los peces influye en el rendimiento de la planta y una combinación de diferentes especies de peces y su rendimiento de crecimiento respectivo permite el ajuste de una acuaponía acoplada a los rendimientos óptimos de peces y plantas. Durante los experimentos consecutivos (*O. niloticus* solamente, *C. gariepinus* solamente), se observó un mayor rendimiento de biomasa de albahaca (*O. basilicum*) del 20,44% (Diferencia de crecimiento de la planta - PGD) para *O. niloticus* en contraste con el rendimiento de albahaca con *C. gariepinus* (Knaus et al. 2018b). Por lo tanto, *O. niloticus* puede usarse para aumentar el rendimiento de la planta en un sistema general de *C. gariepinus*. Este llamado efecto de refuerzo de la tilapia mejora el rendimiento general de producción del sistema y compensa *i*) un crecimiento de planta más pobre con un alto crecimiento de peces de *C. gariepinus*, así como un crecimiento de peces más pobre en *O. niloticus* con un aumento del rendimiento de la planta. Se ha inaugurado una primera granja comercial polinónica en Bali, Indonesia, que produce tilapia combinada con el pez gato asiático (*Clarias batrachus*) y productos agrícolas convencionales.

7.8 PROBLEMAS DE PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DEL SISTEMA

La acuaponía acoplada depende de los nutrientes que se proporcionan a los peces, ya sea un RAS comercial intensivo o tanques almacenados en condiciones extensas en operaciones más pequeñas. La densidad de peces en este último suele ser de unos 15-20 kg/m^3 (tilapia, carpa), pero la producción extensiva de peces africanos puede ser mayor hasta 50 kg/m^3. Estas densidades de almacenamiento diferentes tienen una influencia significativa en los flujos de nutrientes y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, el requisito de control y ajuste de la calidad del agua, así como las prácticas de gestión adecuadas.

La calidad del agua del proceso con respecto a las concentraciones de nutrientes depende principalmente de la composición del alimento y de las respectivas tasas de rotación de los peces. La diferencia entre la entrada de alimento y los nutrientes del alimento, que se asimilan dentro de los peces o se pierden a través del mantenimiento del sistema, es igual al potencial máximo de plantas de nutrientes disponibles de la acuicultura.

Como se señaló anteriormente, las concentraciones de nutrientes deben ajustarse a niveles que permitan que las plantas crezcan de manera efectiva. Sin embargo, no todas las especies de peces son capaces de soportar tales condiciones. En consecuencia, las especies de peces resistentes como el pez gato africano, la tilapia o la carpa son candidatos acuapónicos preferidos. En la Universidad de Rostock, se analizaron los peces enteros y su dieta estándar como valores de salida y entrada para identificar las tasas de rotación de los macronutrientes N, P, K, Ca, Mg y S y los micronutrientes Fe, Mn, Mo, Cu, Zn y Se. Con la excepción de P, más del 50% de los nutrientes del alimento que se dan a los peces no se retienen en su cuerpo y pueden considerarse potencialmente disponibles como nutrientes para las plantas (Strauch et al. 2018; Fig. 7.12). Sin embargo, estos nutrientes no se distribuyen por igual dentro del agua de proceso y los sedimentos. Especialmente los macronutrientes (N, P, K) se acumulan en el agua de proceso, así como dentro de la fracción sólida, mientras que los micronutrientes, como el hierro, desaparecen en la fracción sólida separada por el clarificador. La figura 7.13 muestra la producción de nutrientes por limpieza del clarificador después de 6 días de recolección de lodos en un pez gato africano intensivo RAS.

Las proporciones de nutrientes esenciales para plantas que se unen en los sólidos en relación con las cantidades respectivas que aparecen disueltas son significativas: N = 48%, P = 61%, K = 10%, Ca = 48%, Mg = 16%, S = 11%, Fe = 99%, Mn = 86%, Mo = 100%, Zn = 48% y Cu = 55%.

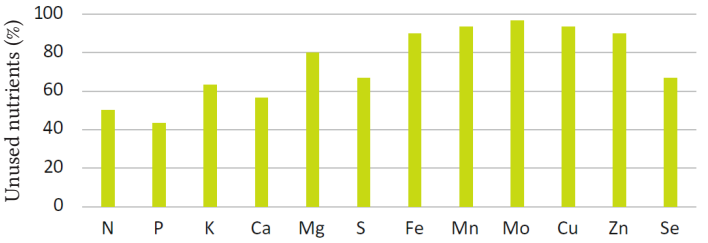


Fig. 7.12 Nutrientes no utilizados en la acuicultura de peces gato africanos que están potencialmente disponibles para la producción de plantas acuapónicas (datos originales)

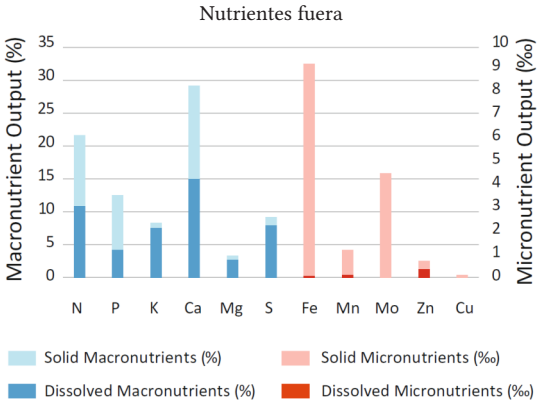


Fig. 7.13 Distribución de macro y micronutrientes dentro del agua de proceso y los sólidos. (Datos de Strauch et al. (2018)

Un factor clave de gestión es la disponibilidad de oxígeno dentro del sistema, que es crucial para mantener alta la concentración de nitrato disponible en la planta en el agua de proceso. Los clarificadores convencionales que se aplican en muchos RAS eliminan los desechos sólidos ricos en carbono de la recirculación, pero los dejarán en contacto con el agua del proceso hasta el próximo intervalo de limpieza del tanque de sedimentación. Durante este tiempo, la materia orgánica rica en carbono se utiliza como fuente de energía mediante la desnitrificación de bacterias, lo que representa pérdidas significativas de nitrato. Emite gases como nitrógeno a la atmósfera y se pierde. En condiciones de producción intensiva, se acumularán grandes cantidades de lodo orgánico dentro de los tanques de sedimentación, con consecuencias para el mantenimiento, el reemplazo con agua dulce y, posteriormente, para la composición de nutrientes dentro del agua de proceso. La figura 7.14 ilustra las concentraciones de nutrientes en los tanques de retención de RAS de peces gato africanos bajo tres densidades de población diferentes (extensivo: 35 peces / tanque, semi-intensivo: 70 peces / tanque, intensivo: 140 peces /

tanque). Cuanto mayor es la densidad de población y menor es el contenido de oxígeno resultante dentro del sistema, menor es el nitrato disponible en la planta por kg de alimento dentro del sistema.

En general, al aumentar la intensidad de los peces, la disponibilidad de oxígeno dentro del sistema disminuye debido al consumo de oxígeno por parte de los peces y la digestión aeróbica de lodos dentro del clarificador y los subsistemas hidropónicos. Los niveles de oxígeno se pueden mantener a niveles más altos, pero esto requiere una inversión adicional para monitorear y controlar el oxígeno.

Este tema es de enorme importancia para la acuaponía acoplada, desde el comienzo de la fase de planificación de los sistemas, ya que los diferentes escenarios son decisivos para la producción de peces planificada, la calidad resultante del agua de proceso para las unidades de producción de la planta y, en consecuencia, para la economía. sustentabilidad. Los cuatro principios de los sistemas de producción acuaponía acoplados con consecuencias de gestión en términos de diseño del sistema, procedimientos de mantenimiento y disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas, con transiciones entre ellos, se pueden definir de la siguiente manera:

Producción extensa, peces resistentes al oxígeno (por ejemplo, tilapia, carpa), sin control de oxígeno, O_2 por encima de 6 mg/L, poco uso de agua con altas concentraciones de nutrientes, pequeña inversión, baja DBO, alto contenido de nitrato por kg de alimento.

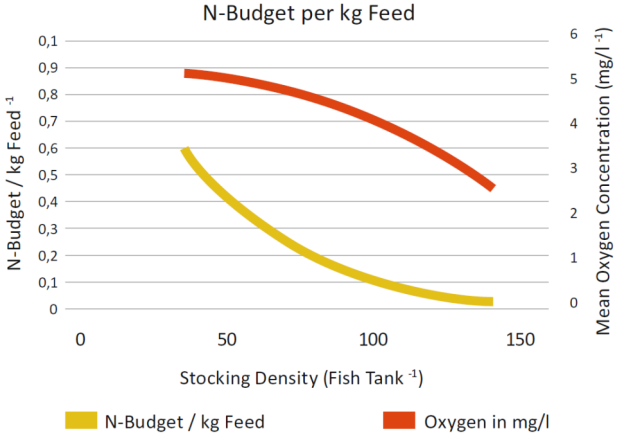


Fig. 7.14 Presupuesto de N por kg de alimento y nivel de oxígeno en la acuicultura de peces africanos en tres densidades de población diferentes (datos originales)

Producción intensiva, peces resistentes al oxígeno (por ejemplo, pez gato africano), sin control de oxígeno, O_2 por debajo de 6 mg/L, uso elevado de agua, inversión media, DBO alta, nitrato bajo por kg de alimento, altas concentraciones de nutrientes.

Producción extensa, peces que requieren oxígeno (por ejemplo, Trucha), control de oxígeno, O_2 superior a 6–8 mg/L, uso elevado de agua, inversión media, DBO baja, nitrato alto por kg de alimento, bajas concentraciones de nutrientes.

Producción intensiva, peces que requieren oxígeno (por ejemplo, trucha, lucioperca), control de oxígeno, O_2 por encima de 6–8 mg/L, uso elevado de agua, alta inversión, baja DBO, nitrato medio por kg de alimento.

Además de la densidad de almacenamiento y la cantidad promedio de oxígeno dentro del sistema, el régimen de producción de la planta, es decir, el cultivo por lotes o escalonado, tiene consecuencias para los nutrientes disponibles de la planta dentro del agua de proceso (Palm et al. 2019). Este es el caso especialmente con peces de rápido crecimiento, donde el aumento de alimento durante el ciclo de producción puede ser tan rápido que debe haber una mayor tasa de intercambio de agua y, por lo tanto, la dilución de nutrientes puede aumentar, con consecuencias para la composición y el manejo de nutrientes.

Los mismos procesos óxicos o anóxicos que ocurren en el RAS como parte del sistema acuapónico acoplado también ocurren dentro de los subsistemas hidropónicos. Por lo tanto, la disponibilidad de oxígeno y posiblemente la aireación del agua de la planta pueden ser cruciales para optimizar la calidad del agua para un buen crecimiento de la planta. El oxígeno permite que las bacterias heterotróficas conviertan los nutrientes orgánicos unidos en la fase disuelta (es decir, el nitrógeno proteico en amonio) y las bacterias nitrificantes para convertir el amonio en nitrato. La disponibilidad de oxígeno en el agua también reduce el metabolismo microbiano anóxico (es decir, bacterias reductoras de nitrato y / o sulfato, Comeau 2008), procesos que pueden tener efectos tremendos en la reducción de las concentraciones de nutrientes. La aireación de las raíces también tiene la ventaja de que el agua y los nutrientes se transportan a la superficie de la raíz, y que las partículas que se depositan en la superficie de la raíz se eliminan (Somerville et al. 2014).

7.9 ALGUNAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ACOPLADOS EN ACUAPONÍA

La siguiente discusión revela una serie de ventajas y desafíos clave de la acuaponía acoplada de la siguiente manera:

Pro: Los sistemas de acuaponía combinados tienen muchos beneficios de producción de alimentos, especialmente el ahorro de recursos en diferentes escalas de producción y en una amplia gama de regiones geográficas. El objetivo principal de este principio de producción es el uso más eficiente y sostenible de los recursos escasos, como los piensos, el agua, el fósforo como nutrientes y energía vegetales limitados. Mientras que la acuicultura y la hidroponía (como independientes), en comparación con la acuaponía son más competitivas, la acuaponía acoplada puede tener la ventaja en términos de sostenibilidad y, por lo tanto, una justificación de estos sistemas, especialmente cuando se ve en el contexto de, por ejemplo, el cambio climático, disminución de recursos, escenarios que podrían cambiar nuestra visión de la agricultura sostenible en el futuro.

Pro: la acuaponía a pequeña escala y en el patio trasero está destinada a apoyar a los locales y producción de alimentos basada en la comunidad por hogares y agricultores. No pueden contener los altos costos de inversión y requieren tecnologías simples y eficientes. Esto aplica para combinaciones probadas de peces y plantas en acuaponía acoplada.

Pro: Las plantas en acuaponía acoplada contemporánea tienen un papel similar en el tratamiento de los desechos que los humedales artificiales en la eliminación de desechos del agua (Fig. 7.15). Por lo tanto, las plantas en la unidad hidropónica en acuaponía acoplada cumplen la tarea de purificar el agua y pueden considerarse una "unidad biológica avanzada de purificación de agua" para reducir el impacto ambiental de la acuicultura.

Reto: se ha aceptado ampliamente que usar solo alimento para peces como insumo para la nutrición de las plantas es a menudo insuficiente cualitativa y cuantitativamente en comparación con los sistemas convencionales de producción agrícola (por ejemplo, abono hidropónico NPK) (Goddek et al. 2016), lo que limita el crecimiento de ciertos cultivos en acuaponía acoplada.

Pro: los sistemas acuapónicos acoplados tienen una influencia positiva en el bienestar de los peces. Los estudios más recientes demuestran que, en combinación con el pepino y la albahaca, se redujo el comportamiento agonista del pez gato africano (*C. gariepinus*) (Baßmann et al. 2017, 2018). Más importante aún, comparar lesiones y patrones de comportamiento con el control, la acuaponía con alta densidad de albahaca influyó en los peces gato africano aún más positivamente. Las plantas liberan sustancias en el agua de proceso como las fosfatasas (Tarafdar y Claassen 1988; Tarafdar et al. 2001) que pueden hidrolizar compuestos de fosfato bioquímicos alrededor del área de la raíz y exudar ácidos orgánicos (Bais et al. 2004). Además, los microorganismos en las superficies de las raíces juegan un papel importante a través de la

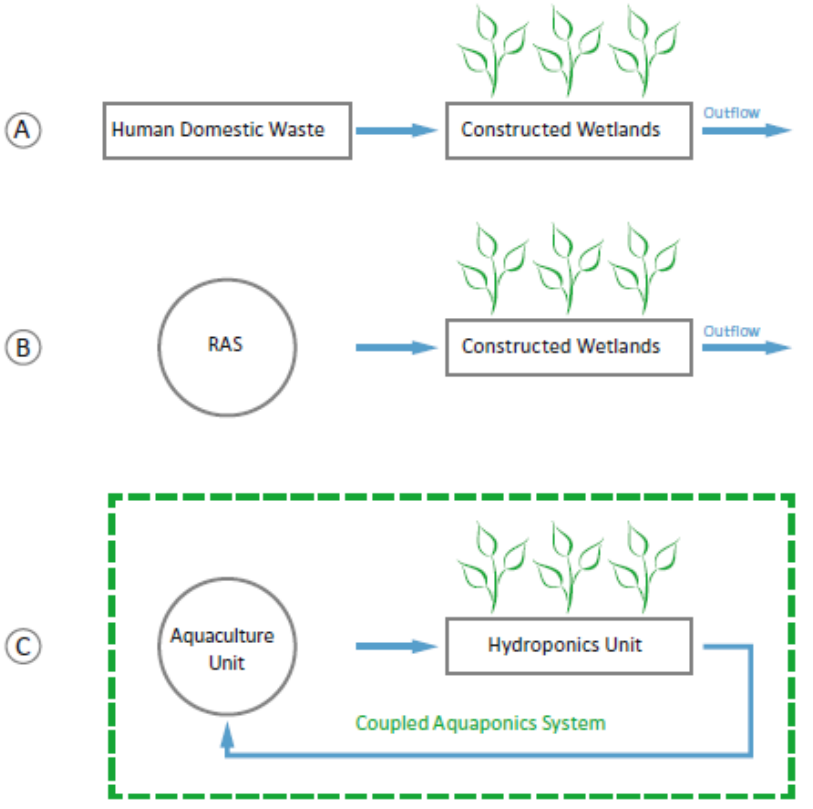


Fig. 7.15 Desarrollo de sistemas de acuaponía acoplados a partir de (a) humedales construidos con desechos domésticos (CW) y (b) CW en combinación con sistemas de recirculación de acuicultura (RAS) a (c) unidades hidropónicas en sistemas acuapónicos acoplados.

excreción de sustancias orgánicas que aumentan la solubilizarían de los minerales, haciéndolos disponibles para la nutrición de las plantas. Es evidente que el ambiente de la rizosfera, el 'exudado de la raíz', consiste en muchos compuestos orgánicos como aniones ácidos orgánicos, fitosideróforos, azúcares, vitaminas, aminoácidos, purinas, nucleósidos, iones inorgánicos, moléculas gaseosas, enzimas y borde de la raíz. células (Dakora y Phillips 2002), que puede influir en la salud de los organismos acuáticos en sistemas acuapónicos acoplados. Esta relación simbiótica no está disponible ni en acuicultura pura ni en acuaponía desacoplada. Sin embargo, aún es necesario realizar una investigación considerable para comprender los factores responsables de un mejor bienestar de los peces.

Pro: La acuaponía puede considerarse como una forma optimizada de la producción agrícola convencional, especialmente en aquellas áreas donde los factores de producción causados por las condiciones

ambientales son particularmente desafiantes, p. en desiertos o áreas urbanas altamente pobladas (ciudades). Los sistemas acuapónicos acoplados se pueden ajustar fácilmente a las condiciones locales, en términos de diseño del sistema y escala de operación.

Reto: la acuaponía acoplada también muestra desventajas, debido a las condiciones de relación de componentes a menudo inadecuadas de los peces y la producción de plantas. Para evitar Como consecuencia del bienestar de los peces, los sistemas de acuaponía acoplados deben equilibrar el aporte de alimento, la densidad de población y el tamaño de las unidades de tratamiento de agua e hidropónicos. Hasta ahora, el conocimiento de las relaciones de componentes en acuaponía acoplada aún es limitado, y el modelado para superar este problema está al principio. Rakocy (2012) sugirió 57 g de alimento/día por metro cuadrado de área de cultivo de lechuga y una proporción compuesta de 1 m3 de tanque de cría de peces por 2 m3 de gravilla que permite una producción de 60 kg/m³ de tilapia. Basado en el sistema UVI, las proporciones de tamaño en sí mismas se percibieron como una desventaja, ya que se debe lograr una proporción relativamente grande de área de cultivo de plantas a área de superficie de peces de al menos 7:3 para una producción adecuada de la planta. Por otro lado, los diseños de sistemas de sistemas acoplados son muy variables, a menudo no comparables, y las experiencias realizadas no pueden transferirse fácilmente a otro sistema o ubicación. En consecuencia, se necesitan muchos más datos de investigación para identificar las mejores relaciones de producción posibles que finalmente también permitan la ampliación de los sistemas de acuaponía acoplados a través de la multiplicación de módulos básicos diseñados óptimamente (ver también el Capítulo 11).

Reto: se ha afirmado que los parámetros adversos de la calidad del agua afectan negativamente la salud de los peces. Como Yavuzcan Yildiz et al. (2017) señalaron que la retención de nutrientes de las plantas debe maximizarse para evitar los efectos negativos de la calidad del agua en el bienestar de los peces. Es importante seleccionar especies de peces adecuadas que puedan aceptar mayores cargas de nutrientes, como el pez gato africano (*C. gariepinus*) o la tilapia del Nilo (*O. niloticus*). Las especies más sensibles como el lucioperca o lucioperca (Sander lucioperca) también podrían aplicarse en acuaponía porque prefieren cuerpos de agua enriquecidos con nutrientes o eutróficos con mayor turbidez (Jeppesen et al. 2000; Keskinen y Marjomäki 2003; [ver sección 7.7.1 Producción de pesces]). Hasta ahora, hay pocos datos que permitan declaraciones precisas sobre las deficiencias del bienestar de los peces. Con plantas que generalmente necesitan altas concentraciones de potasio entre 230 y 400 mg/L dentro del agua de proceso, 200-400 mg/L

de potasio no mostraron una influencia negativa en el bienestar de los peces africanos (Presas Basalo 2017). Del mismo modo, 40 y 80 mg/L de orto-P en el agua de cría no tuvieron un impacto negativo en el rendimiento del crecimiento, la eficiencia alimenticia y los rasgos de bienestar de los peces juveniles africanos (Strauch et al. 2019).

Reto: Otro problema es la posible transmisión de enfermedades en términos de inocuidad de los alimentos a las personas a través del consumo de plantas que han estado en contacto con desechos de peces. En general, la aparición de zoonosis es menor porque la acuaponía cerrada es un sistema totalmente controlado. Sin embargo, los gérmenes pueden acumularse en el agua de proceso de los componentes del sistema o en el intestino de los peces. *Escherichia coli* y *Salmonella* spp. (Bacterias entónicas zoonóticas) se identificaron como indicadores de contaminación fecal y calidad microbiana del agua, sin embargo, se detectaron en acuaponía solo en cantidades muy pequeñas (Munguia-Fragozo et al. 2015). Otra comparación de verduras de hoja verde de textura suave entre acuaponía, hidroponía y producción basada en el suelo no mostró diferencias significativas en los recuentos de placas aeróbicas (APC, bacterias aeróbicas), Enterobacteriácea, *E. coli* no patógena y Listeria, lo que sugiere un nivel de contaminación comparable con los patógenos. (Barnhart et al. 2015). Listeria spp. fue más frecuente (40%) en hidroponía con plantas desraizadas (plantas acuapónicas con raíces 0%, plantas acuapónicas sin raíces <10%), pero no necesariamente las especies dañinas de *L. monocytogenes*. Se sugirió que La fuente de la bacteria puede deberse a la falta de control de la higiene, con poca relevancia para la acuaponía como tal. Otra bacteria infecciosa, fuso bacteria (*Cetobacterium*) detectada por Schmautz et al. (2017) en las heces de peces con una alta prevalencia de hasta el 75%. Los representantes de las fuso bacterias son responsables de enfermedades humanas (gérmenes hospitalarios, abscesos, infecciones), que se reproducen en biopelículas o como parte de los intestinos de los peces. Las infecciones humanas con fuso bacterias por acuaponía aún no se han registrado, pero pueden ser posibles al descuidar los protocolos de higiene requeridos.

En general, hay bastante poca información sobre enfermedades causadas por el consumo de peces y plantas que se originan en sistemas acuapónicos acoplados. En Wilson (2005), el Dr. J.E. Rakocy declaró que no se registraron brotes de enfermedades humanas en 25 años de producción acuapónica acoplada. Sin embargo, se debe utilizar un procedimiento de lavado de los productos vegetales para reducir la cantidad de bacterias como medida de precaución. Chalmers (2004) recomendó un baño de cloro (100 ppm) seguido de un enjuague con agua potable. Si se utiliza esta

metodología y se evita el contacto de las plantas o productos vegetales con el agua del proceso de recirculación, la probabilidad de contaminación con bacterias patógenas humanas puede reducirse considerablemente. Esta es una precaución necesaria no solo para el acoplamiento sino también para todas las demás formas de acuaponía.

REFERENCIAS

Alberts-Hubatsch H, Ende S, Schuhn A, von der Marwitz C, Wirtz A, Fuchs V, Henjes J, Slater M (2017) Integration of hybrid striped bass Morone saxatilis x M. chrysops, noble crayfish Astacus Astacus, watercress Nasturtium officinale and microalge Nannochloropsis limnetica in an experimental aquaponic system. Dubrovnik meeting abstract, EAS 2017 Oostende, Belgium

Al-Hafedh YS, Alam A, Beltagi MS (2008) Food production and water conservation in a recirculating aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. J World Aquacult Soc 39(4):510–520. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2008.00181.x

Appelbaum S, Kotzen B (2016) Further investigations of aquaponics using brackish water resources of the Negev desert. Ecocycles Sci J Eur Ecocycles Soc 2(2):26–35. https://doi.org/10.19040/ ecocycles.v2i2s.53

Bais HP, Park SW, Weir TL, Callaway RM, Vivanco JM (2004) How plants communicate using the underground information superhighway. Trends Plant Sci 9(1):26–32

Barnhart C, Hayes L, Ringle D (2015) Food safety hazards associated with smooth textured leafy greens produced in aquaponic, hydroponic, and soil-based systems with and without roots in retail. University of Minnesota Aquaponics. The University of Minnesota Aquaponics. 17 p

Baßmann B, Brenner M, Palm HW (2017) Stress and welfare of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) in a coupled aquaponic system. Water 9(7):504. https://doi.org/10.3390/ w9070504

Baßmann B, Harbach H, Weißbach S, Palm HW (2018) Effect of plant density in coupled aquaponics on the welfare status of African catfish (Clarias gariepinus). J World Aquacult Soc. (in press)

Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Villarroel M, Kotzen B, Komives T (2016) Nutrient supply of plants in aquaponic systems. Ecocycles Sci J Eur Ecocycles Soc 2(2):17–20. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57

Blidariu F, Drasovean A, Grozea A (2013a) Evaluation of phosphorus level in green lettuce conventional grown under natural conditions and aquaponic system. Bull Univ Agric Sci Vet Med Cluj-Napoca Anim Sci Biotechnol:128–135

Blidariu F, Alexandru D, Adrian G, Isidora R, Dacian L (2013b) Evolution of

nitrate level in green lettuce conventional grown under natural conditions and aquaponic system. Sci Pap Anim Sci Biotechnol 46(1):244–250

Chalmers GA (2004) Aquaponics and food safety. Alberta April, Lethbridge, 77 p

Comeau Y (2008) Microbial metabolism. In: Biological wastewater treatment: principles, modeling and design, Cap, 2. IWA/Cambridge University Press, London, pp 9–32

Dakora FD, Phillips DA (2002) Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. In: Food security in nutrient-stressed environments: exploiting plants' genetic capabilities. Springer, Dordrecht, pp 201–213

Danaher JJ, Shultz RC, Rakocy JE, Bailey DS (2013) Alternative solids removal for warm water recirculating raft aquaponic systems. J World Aquacult Soc 44(3):374–383. https://doi.org/10.1111/jwas.12040

Davy AJ, Bishop GF, Costa CSB (2001) Salicornia L. (*Salicornia pusilla* J. Woods, S. ramosissima J. Woods, S. europaea L., S. obscura PW ball & Tutin, S. nitens PW ball & Tutin, S. fragilis PW ball & Tutin and S. dolichostachya moss). J Ecol 89(4):681–707

Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water 8 (10):467

Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. Aquac Eng 78:130–139

Diem TNT, Konnerup D, Brix H (2017) Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. Aquac Eng 78:95–104. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.05.002

Edaroyati MP, Aishah HS, Al-Tawaha AM (2017) Requirements for inserting intercropping in aquaponics system for sustainability in agricultural production system. Agron Res 15 (5):2048–2067. https://doi.org/10.15159/AR.17.070

Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WNS, Hassan A (2009) Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (Ipomoea aquatica) in an aquaponic recirculating system. Desalin Water Treat 5:19–28. https://doi.org/10.5004/dwt.2009.559

FAO (2017) In: Subasinghe R (ed) World aquaculture 2015: a brief overview, FAO fisheries and aquaculture circular no. 1140. FAO, Rome

Geelen C (2016) Dynamic model of an INAPRO demonstration aquaponic system. Thesis biobased chemistry and technology. Wageningen University Agrotechnology and Food Sciences. 50 p

Goddek S, Vermeulen T (2018) Comparison of Lactuca sativa growth

performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. Aquac Int:1–10. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8

Goddek S, Espinal C, Delaide B, Jijakli M, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman K (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8:303. https://doi.org/10.3390/w8070303

Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246(1–3):147–156

Graber A, Antenen N, Junge R (2014) The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. In: Conference VIVUS: transmission of innovations, knowledge and practical experience into everyday practice. Strahinj: Biotehniški center, Naklo. http://www.bc- naklo.si/uploads/media/29-Graber-Antenen-Junge-Z.pdf

Gunning D (2016) Cultivating Salicornia europaea (Marsh Samphire), Irish Sea Fisheries Board, http://www.bim.ie/media/bim/content/news,and,events/BIM,Cultivating,Salicornia,europaea,-,

Heuvelink E (2018) Tomatoes. In: Heuvelink E (ed) Crop production science in horticulture.Wageningen University/CABI, Wallingford, 388 p

Hortidaily (2015) Dutch start third trial on tomatoes with 100% LED-lighting: 100,6 Kg/m2 at the Improvement Centre in Bleiswijk. What's next? https://www.hortidaily.com/article/6022598/ kg-m-at-the-improvement-centre-in-bleiswijk-what-s-next/

Hussain T, Verma AK, Tiwari VK, Prakash C, Rathore G, Shete AP, Nuwansi KKT (2014) Optimizing koi carp, Cyprinus carpio var. koi (Linnaeus, 1758), stocking density and nutrient recycling with spinach in an aquaponic system. J World Aquacult Soc 45(6):652–661. https://doi.org/10.1111/jwas.12159

Hussain T, Verma AK, Tiwari VK, Prakash C, Rathore G, Shete AP, Saharan N (2015) Effect of water flow rates on growth of Cyprinus carpio var. koi (Cyprinus carpio L., 1758) and spinach plant in aquaponic system. Aquac Int 23(1):369–384. https://doi.org/10.1007/s10499-014-9821-3

Jeppesen E, Jensen JP, SØndergaard M, Lauridsen T, Landkildehus F (2000) Trophic structure, species richness and biodiversity in Danish lakes: changes along a phosphorus gradient. Freshw Biol 45(2):201–218

Keskinen T, Marjomäki TJ (2003) Growth of pikeperch in relation to lake characteristics: total phosphorus, water colour, lake area and depth. J Fish Biol 63(5):1274–1282

Khandaker M, Kotzen B (2018) The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. Aquac Res 49(4):1454–1468

Knaus U, Palm HW (2017a) Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). Aquaculture 466:51–63. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025

Knaus U, Palm HW (2017b) Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). Aquacul- ture 473:62–73. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.020

Knaus U, Segade Á, Robaina L (2015) Training School 1 – Aquaponic trials: improving waterquality and plant production through fish management and diet. 25–29 May 2015, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain. Cost Action FA1305, The EU Aquaponics Hub – Realising Sustainable Integrated Fish and Vegetable Production for the EU

Knaus U, Appelbaum S, Palm HW (2018a) Significant factors affecting the economic sustainability of closed backyard aquaponics systems. Part IV: autumn herbs and polyponics. AACL Bioflux 11(6):1760–1775

Knaus U, Appelbaum S, Castro C, Sireeni J, Palm HW (2018b) Growth performance of basil in a small-scale aquaponic system with the production of tilapia (Oreochromis niloticus) and African catfish (*Clarias gariepinus*). (In preparation)

König B, Junge R, Bittsanszky A, Villarroel M, Komives T (2016) On the sustainability of aquaponics. Ecocycles Sci J Eur Ecocycles Soc 2(1):26–32. https://doi.org/10.19040/ ecocycles.v2i1.50

Kotzen B, Appelbaum S (2010) An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev Desert. J Appl Aquac 22(4):297–320. https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571

Lehmonen R, Sireeni J (2017) Comparison of plant growth and quality in hydroponic and aquaponic systems. Bachelor's thesis, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland. 27 p

Lennard WA, Leonard BV (2004) A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. Aquac Int 12(6):539–553. https://doi.org/10.1007/s10499-004-8528-2

Lennard WA, Leonard BV (2006) A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. Aquac Int 14(6):539–550. https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2

Lewis WM, Yopp JH, Schramm HL Jr, Brandenburg AM (1978) Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. Trans Am Fish Soc 107(1):92–99. https:// doi.org/10.1577/1548-8659(1978)107<92:UOHTMQ>2.0.CO;2

Lobillo JR, Fernández-Cabanás VM, Carmona E, Candón FJL (2014) Manejo básico y resultados preliminares de crecimiento y supervivencia de

tencas (Tinca tinca L.) y lechugas (Lactuca sativa L.) en un prototipo acuapónico. ITEA 110(2):142–159. https://doi.org/10.12706/itea.2014.009

Lorena S, Cristea V, Oprea L (2008) Nutrients dynamic in an aquaponic recirculating system for sturgeon and lettuce (Lactuca sativa) production. Lucrări Ştiinţifice-Zootehnie şi Biotehnologii, Universitatea de Ştiinţe Agricole şi Medicină Veterinară a Banatului Timişoara 41(2):137–143

Lorenzen L (2017) Vergleich des Wachstums von chinesischem Blätterkohl (*Brassica rapachinensis*) in drei verschiedenen Hydroponiksubsystemen unter aquaponischen Bedingungen. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl Aquakultur und Sea-Ranching, Universität Rostock. Masterarbeit. 63 p. [in German]

Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

Loyacano HA, Grosvenor RB (1973) Effects of Chinese waterchestnut in floating rafts on produc- tion of channel catfish in plastic pools. Proc Annu Conf Southeast Assoc Game Fish Comm 27:471–473

Mariscal-Lagarda MM, Páez-Osuna F, Esquer-Méndez JL, Guerrero-Monroy I, del Vivar AR, Félix-Gastelum R (2012) Integrated culture of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and tomato (*Lycopersicon esculentum* mill) with low salinity groundwater: management and production. Aquaculture 366:76–84. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.003

McMurtry MR, Nelson PV, Sanders DC, Hodges L (1990) Sand culture of vegetables using recirculated aquacultural effluents. Appl Agric Res 5(4):280–284

McMurtry MR, Sanders DC, Patterson RP, Nash A (1993) Yield of tomato irrigated with recirculating aquacultural water. J Prod Agric 6(3):428–432. https://doi.org/10.2134/jpa1993.0428

McMurtry MR, Sanders DC, Cure JD, Hodson RG, Haning BC, Amand PCS (1997) Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. J World Aquacult Soc 28(4):420–428. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1997.tb00290.x

Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, Ocampo-Velazquez RV, Garcia-Trejo JF, Guevara-Gonzalez RG (2015) Perspective for aquaponic systems: "omic" technologies for microbial community analysis. BioMed Res Int 2015: 480386. Hindawi Publishing Corporation. BioMed Research International. 2015, 10 pages. https://doi.org/10.1155/2015/480386

Naegel LC (1977) Combined production of fish and plants in recirculating

water. Aquaculture 10 (1):17–24. https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90029-1
Nelson RL, Pade JS (2007) Aquaponic equipment the clarifier. Aquaponics J 4(47):30–31
Nozzi V, Strofaldi S, Piquer IF, Di Crescenzo D, Olivotto I, Carnevali O (2016) Amyloodinum ocellatum in Dicentrarchus labrax: study of infection in salt water and freshwater aquaponics. Fish Shellfish Immunol 57:179–185. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2016.07.036
Nuwansi KKT, Verma AK, Prakash C, Tiwari VK, Chandrakant MH, Shete AP, Prabhath GPWA (2016) Effect of water flow rate on polyculture of koi carp (*Cyprinus carpio* var. *koi*) and goldfish (*Carassius auratus*) with water spinach (*Ipomoea aquatica*) in recirculating aquaponic system. Aquac Int 24(1):385–393. https://doi.org/10.1007/s10499-015-9932-5
Palm HW, Seidemann R, Wehofsky S, Knaus U (2014a) Significant factors influencing the economic sustainability of closed aquaponic systems. part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. AACL Bioflux 7(1):20–32
Palm HW, Bissa K, Knaus U (2014b) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. part II: fish and plant growth. AACL Bioflux. 7(3):162–175
Palm HW, Nievel M, Knaus U (2015) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. part III: plant units. AACL Bioflux 8(1):89–106
Palm HW, Strauch S, Knaus U, Wasenitz B (2016) Das FischGlasHaus – eine Innovationsinitiative zur energie- und nährstoffeffizienten Produktion unterschiedlicher Fisch- und Pflanzenarten in Mecklenburg-Vorpommern ("Aquaponik in MV"). Fischerei & Fischmarkt in Mecklenburg- Vorpommern 1/2016–16:38–47 [in German].
Palm HW, Wasenitz B, Knaus U, Bischoff A, Strauch SM (2017) Two years of aquaponics research in the FishGlassHouse – lessons learned. Dubrovnik meeting abstract, Aquaculture Europe 2017, EAS Oostende Belgium
Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Jijakli MH, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. Aquac Int 26(3):813–842
Palm HW, Knaus U, Wasenitz B, Bischoff-Lang AA, Strauch SM (2019) Proportional up scaling of African catfish (*Clarias gariepinus* Burchell, 1822) commercial recirculating aquaculture sys- tems disproportionally affects nutrient dynamics. Aquac Int 26(3):813–842. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z
Pantanella E (2012) Nutrition and quality of aquaponic systems. Ph.D. thesis. Università degli Studi della Tuscia. Viterbo, Italy. 124 p
Presas Basalo F (2017) Does water potassium concentration in aquaponics

affect the performance of African catfish Clarias gariepinus (Burchell, 1822)? Master's thesis, Department of Animal Sciences Aquaculture and Fisheries Group, Wageningen University and University of Rostock Department of Aquaculture and Sea-Ranching. 75 p

Pribbernow M (2016) Vergleich des Wachstums von Basilikum (Ocimum basilicum L.) in drei verschiedenen Hydroponik-Subsystemen unter aquaponischer Produktion. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl Aquakultur und Sea-Ranching, Universität Rostock. Masterarbeit. 98 p. [in German]

Rakocy JE (1989) Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. In: Island perspectives. Vol. 3. agricultural experiment station, University of the Virgin Islands. pp 5–10

Rakocy JE (2012) Chapter 14: aquaponics – integrating fish and plant culture. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture production systems. Wiley-Blackwell, Oxford, pp 344–386

Rakocy JE, Shultz RC, Bailey DS (2000) Commercial aquaponics for the Caribbean: proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute [Proc. Gulf Caribb. Fish. Inst.]. no. 51, pp 353–364

Rakocy J, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2003) Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. In: South Pacific soilless culture conference- SPSCC 648. pp 63–69

Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Thoman ES (2004) Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. In: New dimensions on farmed Tilapia: proceedings of the sixth international symposium on Tilapia in Aquaculture, held September. pp 12–16

Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC Publication 454:1–16

Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Danaher JJ (2011) A commercial-scale aquaponic system developed at the University of the Virgin Islands. In: Proceedings of the 9th international symposium on Tilapia in Aquaculture. pp 336–343

Ronzón-Ortega M, Hernández-Vergara MP, Pérez-Rostro CI (2012) Hydroponic and aquaponic production of sweet basil (*Ocimum basilicum*) and giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). Trop Subtrop Agroecosyst 15(2):63–71

Sace CF, Fitzsimmons KM (2013) Vegetable production in a recirculating aquaponic system using Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) with and without freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). Acad J Agric Res 1(12):236–250Saha S, Monroe A, Day MR (2016) Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (*Ocimum basilicum L.*) under soilless agricultural systems. Ann Agric Sci 61(2):181–186

Savidov N (2005) Evaluation of aquaponics technology in Alberta, Canada.

Aquaponics Journal 37:20–25
Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits TH (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199(4):613–620
Seawright DE, Stickney RR, Walker RB (1998) Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems. Aquaculture 160(3–4):215–237. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3
Shete AP, Verma AK, Chadha NK, Prakash C, Peter RM, Ahmad I, Nuwansi KKT (2016) Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with common carp (Cyprinus carpio) and mint (Mentha arvensis). Aquac Eng 72:53–57. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.04.004
Simeonidou M, Paschos I, Gouva E, Kolygas M, Perdikaris C (2012) Performance of a small-scale modular aquaponic system. AACL Bioflux. 5(4):182–188
Skar SLG, Liltved H, Drengstig A, Homme JM, Kledal PR, Paulsen H, Björnsdottir R, Oddson S, Savidov N (2015) Aquaponics NOMA (Nordic Marin) – new innovations for sustainable aquaculture in the Nordic countries. Nordic Innovation Publication 2015:06, 108 p
Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming, FAO fisheries and aquaculture technical paper no. 589. FAO, Rome. (262 pp)
Strauch SM, Wenzel LC, Bischoff A, Dellwig O, Klein J, Schüch A, Wasenitz B, Palm HW (2018) Commercial African catfish (Clarias gariepinus) recirculating aquaculture systems: assessment of element and energy pathways with special focus on the phosphorus cycle. Sustainability 2018 (10):1805. https://doi.org/10.3390/su10061805
Strauch SM, Bischoff AA, Bahr J, Baßmann B, Oster M, Wasenitz B, Palm HW (2019, submitted) Effects of ortho-phosphate on growth performance, welfare and product quality of juvenile African catfish (Clarias gariepinus). Fishes 4:3. https://doi.org/10.3390/fishes4010003
Sutton RJ, Lewis WM (1982) Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants. Progress Fish Cult 44(1):55–59. https://doi.org/10.1577/1548-8659(1982)44[55,FOOAFP]2.0.CO;2
Tarafdar JC, Claassen N (1988) Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. Biol Fertil Soils 5(4):308–312
Tarafdar JC, Yadav RS, Meena SC (2001) Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. J Plant Nutr Soil Sci 164(3):279–282
Thorarinsdottir RI (2014) Implementing commercial aquaponics in Europe

– first results from the Ecoinnovation project EcoPonics. Aquaculture Europe 14, October 14–17 2014, San Sebastian, Spain Thorarinsdottir RI, Kledal PR, Skar SLG, Sustaeta F, Ragnarsdottir KV, Mankasingh U, Pantanella E, van de Ven R, Shultz RC (2015) Aquaponics guidelines. 64 p

Tran H (2015) Aquaponics-coupled and decoupled systems and the water quality needs of each. World Aquaculture 2015 – Meeting Abstract Jeju, Korea, May 27, 2015. World Aquaculture Society PO Box 397 Sorrento, LA 70778–0397 (USA)

Tyson RV, Simonne EH, Treadwell DD, White JM, Simonne A (2008) Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. Hortscience 43(3):719–724

USGS. The USGS Water Science School. https://water.usgs.gov/edu/gallery/global-water-volume. html

Van der Heijden PGM, Roest CWJ, Farrag F, ElWageih H, Sadek S, Hartgers EM, Nysingh SL (2014) Integrated agri-aquaculture with brackish waters in Egypt: mission report (March 9– March 17, 2014) (No. 2526). Alterra Wageningen UR

Villarroel M, Rodriguez Alvariño JM, Duran Altisent JM (2011) Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. Span J Agric Res 9 (2):537–545

Waller U, Buhmann AK, Ernst A, Hanke V, Kulakowski A, Wecker B, Orellana J, Papenbrock J (2015) Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. Aquac Int 23(6):1473–1489. https://doi. org/10.1007/s10499-015-9898-3

Watten BJ, Busch RL (1984) Tropical production of tilapia (Sarotherodon aurea) and tomatoes (Lycopersicon esculentum) in a small-scale recirculating water system. Aquaculture 41 (3):271–283. https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90290-4

Wermter L (2016) Comparison of three different hydroponic sub-systems of Cucumis sativus L. grown in an aquaponic system. Department of Agronomy. Faculty of Agricultural and Environmental Sciences (AUF), Professorship of Crop production and Aquaculture and Sea-Ranching. University of Rostock, Germany. Masterthesis. 40 p

Wilson G (2005) Greenhouse aquaponics proves superior to inorganic hydroponics. Aquaponics J 39(4):14–17

Yavuzcan Yildiz H, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. Water 9(1):13

Zimmermann J (2017) Vergleich des Wachstums von Marokkanischer Minze (*Mentha spicata*) in drei verschiedenen Hydroponik Subsystemen unter aquaponischer Produktion. Agrar- und Umweltwissenschaftliche

Fakultät, Lehrstuhl Aquakultur und Sea-Ranching, Universität Ros- to ck. Masterarbeit. 71 p. [in German].

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 8

SISTEMAS DE ACUAPONÍA DESACOPLADOS

Simon Goddek, Alyssa Joyce, Sven Wuertz, Oliver Körner, Ingo Bläser, Michael Reuter, and Karel J. Keesman

Capítulo 8.

SISTEMAS DE ACUAPONÍA DESACOPLADOS

Simon Goddek, Alyssa Joyce, Sven Wuertz, Oliver Körner, Ingo Bläser, Michael Reuter, and Karel J. Keesman

Resumen

Los sistemas tradicionales de acuaponía se organizaron en un solo ciclo de proceso que dirige el agua rica en nutrientes desde los peces a las plantas y viceversa. Dados los diferentes requisitos específicos de nutrientes y requisitos ambientales de las plantas y los peces, tales sistemas presentaron un compromiso con las condiciones ideales para la cría de ambos, reduciendo así la eficiencia y la productividad de dichos sistemas acoplados. Más recientemente, los diseños que permiten el desacoplamiento de las unidades proporcionan una regulación más ajustada en el proceso del agua en cada una de las unidades respectivas, a la vez que permiten un mejor reciclaje de los nutrientes del lodo. Los sólidos suspendidos de los peces (por ejemplo; Heces y alimentos no consumidos) deben eliminarse del proceso del agua antes de que el agua pueda dirigirse a las plantas para evitar la obstrucción de los sistemas hidropónicos, un paso que representa una pérdida significativa de nutrientes totales, el más importante es el fósforo. La reutilización del lodo y la movilización de nutrientes contenidos dentro de ese lodo presentan una serie de desafíos de ingeniería que, si se abordan de manera creativa, pueden aumentar drásticamente la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas acuapónicos. Una solución es separar, o cuando hay patógenos o problemas de contaminación, aislar los compo-

S. Goddek* K.J.Keesman
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
E-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
A. Joyce*
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Swede.
E-mail: alyssa.joyce@gu.se
S. Wuertz
Department Ecophysiology and Aquaculture, Leibniz-Institute of Freshwater Biology and Inland Fisheries, Berlin, Germany
e-mail: wuertz@igb-berlin.de
O. Körner
Leibniz-Institute of Vegetable and Ornamental Crops (IGZ), Grossbeeren, Germany
e-mail: koerner@igzev.de
I. Bläser M. Reuter
aquaponik manufaktur GmbH, Issum, Germany
e-mail: ingo.blaeser@aquaponik-manufaktur.de

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8

nentes del sistema, maximizando así el control general y la eficiencia de cada componente, al tiempo que se reducen los compromisos entre las condiciones y los requisitos específicos de cada subsistema. Otra innovación potencial que es posible gracias al desacoplamiento de unidades, implica la introducción de bucles adicionales en los que los biorreactores se pueden usar para tratar el lodo. Un circuito de destilación adicional puede garantizar mayores concentraciones de nutrientes para la unidad hidropónica y, al mismo tiempo, reducir los efectos adversos sobre la salud de los peces debido a los altos niveles de nutrientes en la unidad RAS. Varios estudios han documentado el rendimiento de la digestión aeróbica y anaeróbica de los biorreactores para tratar el lodo, pero los beneficios del digestor en el crecimiento de las plantas no están bien investigados. Los componentes de remineralización y destilación tienen un alto potencial inexplorado para mejorar los sistemas de acuaponía desacoplados.

Palabras clave: Acuapónicos desacoplados; acuaponía de múltiples bucles; Sistemas dinámicos; diseño de sistemas; digestión anaeróbica; Desalinización.

8.1 INTRODUCCIÓN

Como se discutió en Cap. 5 y 7, los sistemas de acuaponía de circuito único están bien investigados, pero dichos sistemas tienen una eficiencia general subóptima (Goddek et al.2016; Goddek y Keesman 2018). A medida que la acuaponía escala a la producción a nivel industrial, se ha puesto énfasis en aumentar la viabilidad económica de tales sistemas. Una de las mejores oportunidades para optimizar la producción en términos de rendimiento de cosecha puede lograrse desacoplando los componentes dentro de un sistema de acuaponía para asegurar condiciones óptimas de crecimiento tanto para peces como para plantas. Los sistemas desacoplados difieren de los sistemas acoplados en la medida en que separan los bucles de agua y nutrientes tanto de la unidad de acuicultura como de hidroponía entre sí y, por lo tanto, proporcionan un control de la química del agua en ambos sistemas. La Figura 8.1 proporciona una visión general esquemática de un sistema acoplado tradicional (A), un sistema de dos bucles desacoplados (B) y un sistema de múltiples bucles desacoplados (C). Sin embargo, existe un debate considerable sobre si los sistemas de acuaponía desacoplados son económicamente ventajosos sobre los sistemas más tradicionales, dado que requieren más infraestructura. Para responder a esa pregunta, es necesario considerar diferentes diseños de sistemas para identificar sus fortalezas y debilidades.

El concepto de un sistema de acuaponía de un circuito acoplado como se muestra en la figura 8.1a puede considerarse como la base tradicional de todos los sistemas de acuaponía en los que el agua recircula libremente entre las unidades de acuicultura e hidroponía, mientras que el lodo rico en nutrientes se descarga. Uno de los inconvenientes clave de tales sistemas es que es necesario hacer concesiones en las condiciones de cría de ambos subsistemas en términos de pH, temperatura y concentraciones de nutrientes (Tabla 8.1).

Por el contrario, los sistemas de acuaponía desacoplados o de dos bucles separan las unidades de acuicultura y acuaponía (Fig. 8.1b). Aquí, el tamaño de la unidad hidropónica es un aspecto crítico, porque idealmente necesita asimilar los nutrientes proporcionados por la unidad de los peces directamente o mediante mineralización de lodo (por ejemplo, extracción de nutrientes del lodo y proporcionarlo a las plantas en forma soluble). De hecho, tanto el tamaño del área de la planta como las condiciones ambientales (por Ej., Superficie, índice del área de la hoja, humedad relativa, radiación solar, etc.) determinan la cantidad de agua que se puede evapotranspirar y son los principales factores que determinan la tasa de reemplazo de agua RAS. En consecuencia, el agua enviada desde el RAS a la unidad hidropónica se reemplaza por agua limpia que reduce las concentraciones de nutrientes y, por lo tanto, mejora la calidad del agua (Monsees et al. 2017a, b). La cantidad de agua que se puede reemplazar depende de la tasa de evapotranspiración de las plantas controlada por la radiación neta, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y las especies de cultivo.

En particular, existe una dependencia estacional, con más agua evaporada en las estaciones más cálidas y soleadas, que también es cuando las tasas de crecimiento de las plantas son más altas. Este enfoque ha sido sugerido por Goddek et al. (2015) y Kloas et al. (2015) como un enfoque para mejorar el diseño de sistemas de un circuito y una mejor capacidad de utilización para asegurar un rendimiento óptimo del crecimiento de la planta. El concepto ha sido adoptado, entre otros, por ECF en Berlín, Alemania, y los ahora en bancarrota Urban Farmers en La Haya, Países Bajos.

A pesar de los posibles beneficios, los experimentos iniciales con un diseño de bucle único desacoplado encontraron serios inconvenientes. Esto se debió a las altas cantidades de nutrientes adicionales que se necesitaban agregar al circuito hidropónico dado que el flujo de agua del proceso desde el RAS al circuito hidropónico es puramente dependiente de la evapotranspiración (Goddek et al. 2016; Kloas et al. 2015; Reyes Lastiri et al.2016). Los nutrientes también tienden a acumularse en los sistemas RAS

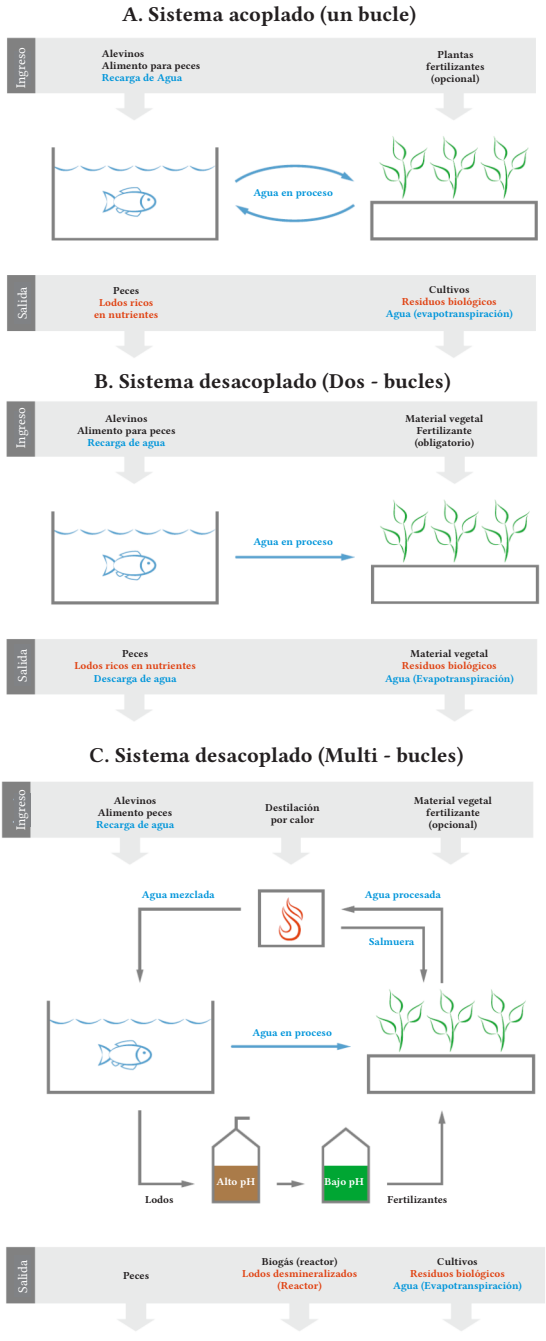


Fig. 8.1 Evolución de los Sistemas Acuapónicos. (a) Muestra de un Bucle Tradicional de Sistema acuapónico Alevinos Alimento para peces Recarga de AguaA. Sistema Acoplado (un Bucle) Plantas Fertilizante (opcional) (b) Un sistema Acuapónico simple desacoplado, y (c) un Sistema acuapónico desacoplado multibucles. El fuente azul representa el agua entrada, salida y flujos de agua y el rojo para los productos de desecho.

cuando las tasas de evapotranspiración son más bajas y pueden alcanzar niveles críticos, por lo que requieren una purga periódica del agua (Goddek 2017).

La superación de estos inconvenientes requirió la implementación de bucles adicionales para reducir la cantidad de residuos producidos en el sistema (Goddek y Körner 2019). Dichos sistemas de múltiples bucles se describen en la figura 8.1c y mejoran el enfoque de dos bucles (8.1b) con dos unidades que se explorarán más de cerca en los siguientes dos subcapítulos, así como en los capítulos. 10 y 11:

1. Mineralización y movilización eficiente de nutrientes, utilizando un sistema de reactor anaeróbico de dos etapas para reducir la descarga de nutrientes del sistema a través del lodo de residuos de los peces.
2. Tecnología de destilación / desalinización térmica para concentrar la solución nutritiva en la unidad hidropónica para reducir la necesidad de fertilizantes adicionales.

Dichos enfoques han sido implementados en parte por varios productores de acuaponía, como la empresa española NerBreen (Fig. 8.1) (Goddek y Keesman 2018), así como Kikaboni AgriVentures Ltd. en Nairobi, Kenia (van Gorcum et al.2019) (Fig. 8.2).

En términos de ventajas económicas (Goddek y Körner 2019; Delaide et al.2016), la optimización de las condiciones de crecimiento en cada ciclo respectivo de sistemas de acuaponía desacoplados tiene ventajas inherentes tanto para las plantas como para los peces (Karimanzira et al. 2016; Kloas et al. 2015) reduciendo la descarga de residuos y mejorando la recuperación y el suministro de nutrientes (Goddek y Keesman 2018; Karimanzira et al. 2017; Yogev et al. 2016). En su trabajo, Delaide et al. (2016), Goddek y Vermeulen (2018), y Woodcock (comunicación personal) muestran que los sistemas de acuaponía desacoplados logran un mejor rendimiento de crecimiento que sus respectivos grupos de control de acuaponía e hidroponía de un bucle. A pesar de esto, hay varios problemas que aún deben resolverse, incluidos problemas técnicos como la escala del Sistema, la optimización de parámetros y las opciones de ingeniería para las tecnologías de efecto invernadero para diferentes escenarios regionales.

En el resto de este capítulo, nos centraremos en algunos de los desarrollos actuales para proporcionar una visión general de los desafíos actuales, así como los desarrollos prometedores en el campo.

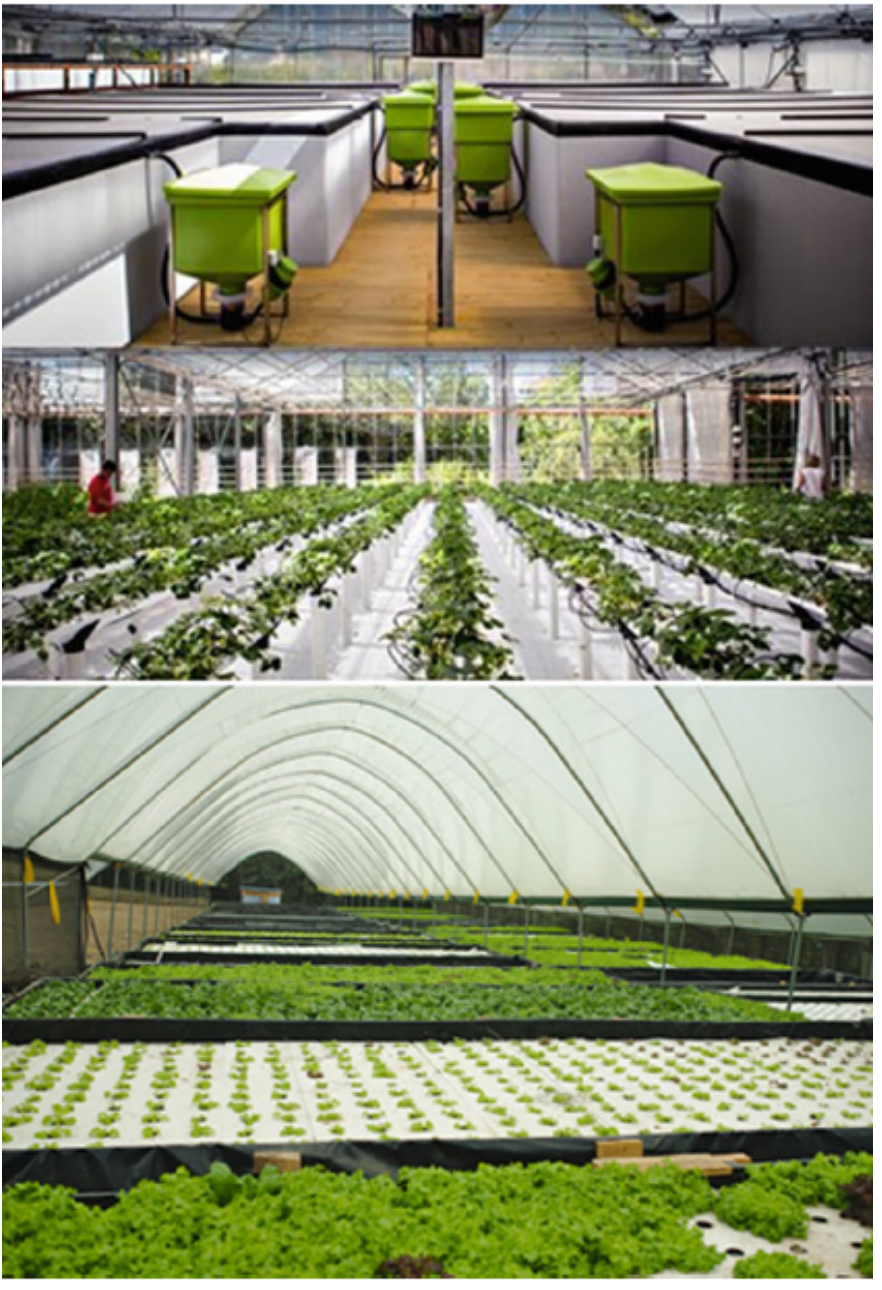


Fig. 8.2 Imágenes del sistema de circuito múltiple existente en (1) España (NerBreen) y (2) Kenia (Kikaboni AgriVentures Ltd.). Mientras que el sistema NerBreen se encuentra en un entorno controlado, el sistema Kikaboni está utilizando un sistema de túnel de aluminio semiabierto

8.2 LAZO DE MINERALIZACIÓN

En RAS, el lodo sólido y rico en nutrientes debe eliminarse del sistema para mantener la calidad del agua. Al agregar un ciclo adicional de reciclaje de lodos, la acumulación de desechos RAS se puede convertir en nutrientes disueltos para su reutilización por las plantas en lugar de desecharse (Emerenciano et al.2017). Dentro de los biorreactores, los microorganismos pueden descomponer este lodo en nutrientes biodisponibles, que posteriormente se pueden entregar a las plantas (Delaide et al. 2018; Goddek et al. 2018; Monsees et al. 2017a, b). Muchos sistemas de acuaponía de un circuito ya incluyen digestores aeróbicos (Rakocy et al. 2004) y anaeróbicos (Yogev et al. 2016) para transformar los nutrientes atrapados en el lodo de peces y hacerlos biodisponibles para las plantas. Sin embargo, la integración de un sistema de este tipo en un sistema de acuaponía de un circuito tiene varias desventajas:

1. El factor de dilución para los efluentes ricos en nutrientes es mucho mayor cuando se descargan a un sistema de circuito único en relación con la descarga a la unidad hidropónica solamente. Efectivamente, los nutrientes se diluyen al entrar en contacto con grandes volúmenes de agua de cría de peces.
2. Los peces están expuestos innecesariamente a los efluentes del reactor de mineralización; p.ej. Los efluentes de los reactores anaeróbicos pueden incluir ácidos grasos volátiles (AGV) y amonio que podrían dañar los peces; tales reactores también representan una fuente adicional para la posible introducción de patógenos.
3. Alrededor del los 90% de los nutrientes atrapados en el lodo pueden recuperarse cuando el lodo RAS se mantiene a un pH de 4 (Jung y Lovitt 2011). Un pH tan bajo no es posible cuando se operan biorreactores a un pH alrededor de 7 (Goddek et al.2018), que es el valor de pH de compensación habitual dentro de los sistemas de acuaponía de un circuito.

Con respecto al pH, la figura 8.3 muestra los valores de pH aproximados de los respectivos flujos de agua de proceso en un sistema de acuaponía de múltiples circuitos (por ejemplo, como se presenta en la figura 8.1c). La Figura 8.3 también muestra el impacto de los reactores de mineralización en el rendimiento del sistema en su conjunto, basado en los reactores anaeróbicos propuestos por Goddek et al. (2018) Tal sistema representa solo una posible solución para tratar el lodo, con enfoques alternativos discutidos en el capítulo. 10. La disminución del pH del agua de proceso que fluye del subsistema RAS hacia el circuito hidropónico, como se muestra en la figura 8.3, demuestra la acidificación en el circuito de

concentración de nutrientes (es decir, el agua desmineralizada tiene un pH de 7). Por lo tanto, el efluente tiene un pH más bajo que la salida RAS, lo que reduce la necesidad de ajustar el pH para condiciones óptimas de crecimiento de la planta.

El sistema reactor de dos etapas funciona de la siguiente manera:

En la primera etapa (pH alrededor de 7 para proporcionar condiciones óptimas para la metanogénesis; Tabla 8.1), la materia orgánica se descompone para mantener un alto grado de producción de metano (es decir, eliminación de carbono). Mirzoyan y Gross (2013) informaron una

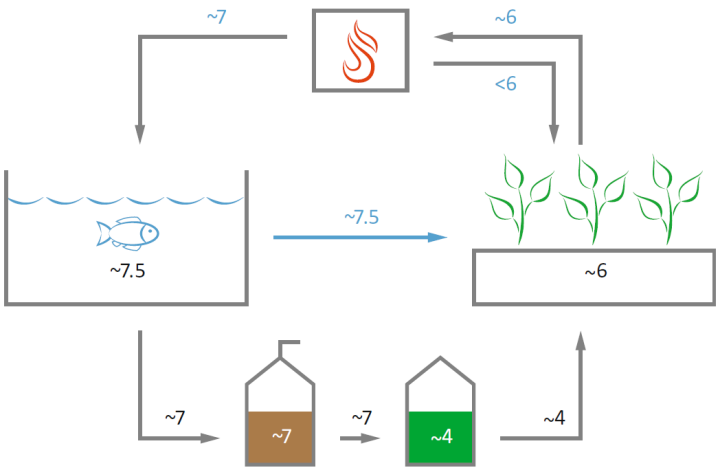


Fig. 8.3 El pH aproximado del agua dentro de los diferentes componentes del sistema, así como el agua del proceso. El "~" indicó una aproximación

Tabla 8.1 Resumen de condiciones óptimas de crecimiento para peces y plantas y condiciones operativas preferidas para el tratamiento de reciclaje de nutrientes de lodo

Subsistema	Especies/función	pH	Temperatura (°C)	Nitrato (NO3) (mg/L)
Sistema de recirculación acuícola (RAS)	*Oreochromis niloticus* (tilapia del Nilo)	7–9 (Ross 2000)	27–30 (El-Sayed 2006	<100–200 (Dalsgaard et al.2013
	Oncorhynchus mykiss (trucha arcoíris)	6.5–8.5 (FAO 2005)	15 (Coghlan and Ringler 2005)	<40 (Davidson et al. 2011; Schrader et al.2013
Hidroponía	*Lactuca sativa* (lechuga)	5.5–6.5 (Resh 2012)	21–25 (Resh 2012	730 (Resh 2012
	Lycopersicon esculentum (tomate)	6.3–6.5 (Resh 2002)	18–24 (Resh 2002	666 (Sonneveld and Voogt 2009
Reactor Anaeróbico	Methanogenesis	6.8–7-4 (de Lemos Chernicharo2007)	30–35 (Alvarez and Lidén 2008; de Lemos Chernicharo 2007)	–
	Movilización de lodos	4.0 (Jung and Lovitt 2011)	n/a	–

reducción total de sólidos en suspensión de alrededor del 90%, utilizando la tecnología de reactor de capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente. Esto tiene la ventaja de que (1) el biogás se cosecha como fuente de energía renovable y (2) se producen menos VFA en la segunda etapa. El tiempo de retención del lodo en la primera etapa debe ser de varios meses, antes de eliminar los nutrientes acumulados en el lodo (por ejemplo, la agregación de fosfato de calcio) dentro de la segunda etapa.

En la segunda etapa, los nutrientes en los sólidos en suspensión se movilizan de manera efectiva y están disponibles para la absorción de las plantas. Esta movilización es la más efectiva en un entorno de pH bajo (Goddek et al.2018; Jung y Lovitt 2011). Una vez que disminuye el pH de los reactores ácidos, generalmente permanece estable; por lo tanto, se requiere menos regulación del pH en la unidad hidropónica.

Los efluentes que son ricos en nutrientes pueden requerir algún tratamiento posterior dependiendo de la cantidad de sólidos suspendidos totales medidos y AGV. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el amonio puede estimular el crecimiento de las plantas, p. hojas verdes, cuando representa el 5–25% de la concentración total de nitrógeno (Jones 2005). Sin embargo, los vegetales de frutas como los tomates o los pimientos dulces son particularmente sensibles al amonio en la solución nutritiva. Se requeriría un tratamiento aeróbico post-efluente o un sumidero hidropónico bien aireado en los sistemas que cultivan ese tipo de cultivos.

8.2.1 Determinación de flujos de agua y nutrientes

Para el dimensionamiento del Sistema (Sección. 8.4), debe conocerse la cantidad de agua que fluye del Sistema RAS a través de los reactores a la unidad hidropónica (QMIN) (Ec. 8.1):

$$Q_{MIN}\ (kg/day) = \frac{n_{alimentación} \times K_{lodos}}{\pi_{lodos}} \qquad (8.1)$$

Donde $n_{alimentación}$ es la cantidad de alimento en Kg, k_{lodos} es la proporción del coeficiente de alimentación de peces que termina como lodo, y π_{lodos} es la proporción de sólidos totales (es decir, lodo) en el flujo de agua del lodo que ingresa al circuito de mineralización.

La concentración de lodo se puede aumentar agregando un dispositivo de separación por gravedad antes de los biorreactores, dirigiendo el sobrenadante "claro" de regreso al sistema RAS. Esta fórmula también se

puede utilizar para obtener una entrada para dimensionar el reactor en función del tiempo de retención hidráulica (cap. 10). Entre el 20 y el 40% de la alimentación de los peces termina como sólidos suspendidos totales en el lodo derivado de RAS (Timmons y Ebeling 2013). Como ejemplo, se ha descubierto que el lodo de tilapia contiene alrededor del 55% de los nutrientes que se agregaron al sistema a través del alimento (Neto y Ostrensky 2013; Yavuzcan Yildiz et al. 2017), lo que representa un recurso valioso para el crecimiento de los cultivos.

Los principales nutrientes que pueden recuperarse mediante un proceso de mineralización son N y P. Como P (uno de los componentes principales del lodo) es el macronutriente más valioso en términos de costo y disponibilidad para la producción de cultivos, debería ser el primer elemento a ser optimizado en el sistema acuapónico.

La tasa de mineralización del ciclo de mineralización se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Mineralización (g/day)} = (n_{\text{alimentación}} \times 1000) \times \pi_{\text{alimentación}} \times \pi_{\text{lodos}} \times \eta_{\text{min}} \quad (8.2)$$

Donde $n_{\text{alimentación}}$ es la entrada de alimentación al sistema (en kg); $\pi_{\text{alimentación}}$ es la proporción del nutriente en la formulación del alimento; π_{lodos} es la proporción de un elemento derivado específico del alimento que termina en el lodo; y η_{min} es la mineralización y la eficiencia de movilización del sistema del reactor.

El último paso sería determinar la concentración del elemento respectivo en el efluente del ciclo de mineralización:

$$\text{Concentración de nutriente (mg/L)} = \frac{\text{Mineralización} \times 1000}{Q_{\text{min}}} \quad (8.3)$$

Por ejemplo 8.1
Nuestro sistema RAS se alimenta con 10 kg de alimento para peces por día. Suponemos que el 25% de la alimentación alimentada termina como lodo. En nuestro sistema, usamos un Set de Flujo Radial (RFS) para concentrar el lodo a 1% de materia seca. En consecuencia, el flujo del RAS a HP a través del ciclo de mineralización se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{\text{MIN}}\ (\text{kg/day}) = \frac{10\ \text{kg} \times 0{,}25}{0{,}01}$$

Decidimos dimensionar nuestro sistema en P. El contenido de P de nuestro alimento (en la mayoría de los casos provisto por el fabricante del alimento) es del 1,5% y el 55%

termina en el lodo (Neto y Ostrensky 2013). Suponemos que nuestros reactores logran una eficiencia de mineralización del 90% para este elemento. Por lo tanto, se pueden determinar los gramos de P transferidos a la unidad hidropónica cada día:

$$\text{Mineralización (g/día)} = (10\text{kg} \times 1000) \times 0{,}55 \times 0{,}015 \times 0{,}9 = 74{,}25$$

La concentración del efluente es consecuentemente

$$\text{Concentración de nutriente (mg/L)} = \frac{74{,}25 \times 1000}{250\text{L}} = 297 \text{ mg/L}$$

Esta concentración de P en el efluente en el cuadro de ejemplo anterior es aproximadamente seis veces mayor que en la mayoría de las soluciones de nutrientes hidropónicos. La investigación de Goddek et al. (2018) respalda este número teórico, e informan que su lodo RAS contenía 150 y 200 mg /l de P para dos sistemas independientes, respectivamente (1% de lodo TSS), con un contenido de P de alimentación de los peces de 0,83% en materia de materia seca para este último (200 mg/l).

8.3 BUCLE DE DESTILACIÓN /DESALINIZACIÓN

En los sistemas de acuaponía desacoplados, hay un flujo unidireccional desde el RAS hacia la unidad hidropónica. En la práctica, las plantas absorben el agua suministrada por RAS, que a su vez se completa con agua fresca (es decir, agua del grifo o lluvia). La salida necesaria de la unidad RAS es igual a la diferencia entre el agua que vende el sistema HP a través de las plantas (ya través de la unidad de destilación) y el agua que ingresa a la unidad hidropónica desde el reactor de mineralización, si el sistema incluye un reactor (Fig. 8.4) Un resumen simplificado es el requerimiento de flujo de agua a largo plazo de RAS a HP es igual al consumo de agua del cultivo por evapotranspiración y almacenamiento de agua de la planta en la biomasa de la planta.

La implementación de una unidad de destilación como se muestra en la figura 8.3 representa una solución potencial para este dilema. Dichas tecnologías de destilación (p. Ej., Térmica destilación de membrana) tienen el potencial de separar sales disueltas y nutrientes del agua (Shahzad et al.2017; Subramani y Jacangelo 2015).

En el contexto de los sistemas de acuaponía de circuito múltiple, y como una alternativa a la fertilización adicional y la purga de agua con los costos adicionales correspondientes, esta tecnología no solo podría proporcionar agua dulce al sistema sino también alcanzar las concentraciones de nutrientes deseadas para los subsistemas respectivos (Goddek y Keesman 2018).

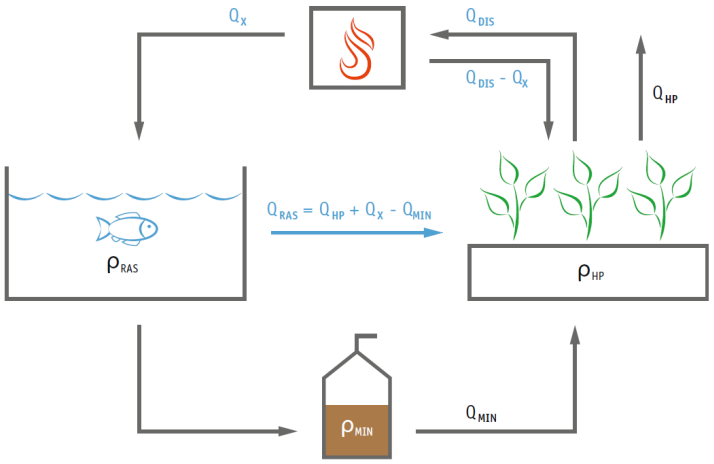


Fig. 8.4 Esquema de flujos de agua y diferentes concentraciones de nutrientes en un sistema de acuaponía desacoplado, donde Q, es flujo volumétrico en L; ρ, concentración de nutrientes en mg / L; RAS, sistema de recirculación de la acuicultura; MIN, reactor de mineralización; DIS, unidad de destilación; y X, parámetro de flujo desconocido / flexible

Para la implementación (es decir, el tamaño) de dicha unidad de destilación, se pueden usar ecuaciones de balance de masa simples. Sin embargo, el sistema restante debe dimensionarse de antemano (ya sea mediante reglas generales o mediante ecuaciones de balance de masa; ver sección.) (8.5), porque los nutrientes que ingresan al sistema deben estar en equilibrio con los nutrientes biodisponibles absorbidos por el cultivo (Nota: el punto óptimo de los sistemas desacoplados es su flexibilidad. En consecuencia, también se puede sobredimensionar la parte hidropónica del sistema, aunque eso requerirá el uso de más fertilizantes). La forma más fácil de estimar la absorción de nutrientes es utilizar la suposición de que los nutrientes se absorben / absorben de la misma manera que los iones disueltos en el agua de riego (es decir, sin resistencias químicas, biológicas o físicas específicas de los elementos). En consecuencia, para mantener el equilibrio, todos los nutrientes que el cultivo recoge como están contenidos en la solución de nutrientes deben agregarse nuevamente al sistema hidropónico (Ec. 8.4).

$$\phi_{RAS} + \phi_{MIN} - \phi_{HP} = 0 \qquad (8.4)$$

donde ϕRAS es el flujo de nutrientes del sistema RAS al sistema hidropónico, ϕMIN es el flujo de nutrientes de la unidad de mineralización al sistema hidropónico y ϕHP es la absorción de nutrientes por parte de la planta. Para esta ecuación, se supone que el sistema de destilación tiene una eficiencia cercana al 100%. Por lo tanto, Q_{DIS} vuelve al subsistema

hidropónico.

Por consiguiente:

$$(\rho_{HP} \times Q_{HP}) = (\rho_{RAS} \times Q_{RAS}) + (\rho_{MIN} \times Q_{MIN}) \quad (8.5)$$

donde Q es el volumen de flujo en L y ρ es la concentración de nutrientes en mg/L.

Como se indicó anteriormente, el flujo de RAS a la unidad hidropónica es la diferencia de la suma de los flujos de agua que salen del sistema hidropónico (es decir, $Q_{HP} + Q_X$) y el flujo de entrada del biorreactor (Q_{MIN}), es decir $Q_{RAS} = Q_{HP} + Q_X - Q_{MIN}$, lo que nos lleva a la siguiente ecuación:

$$(\rho_{HP} \times Q_{HP}) = (\rho_{RAS} \times Q_{PH}) + (\rho_{RAS} \times Q_X) - (\rho_{RAS} \times Q_{MIN}) + (\rho_{MIN} \times Q_{MIN}) \quad (8.6)$$

La variable objetivo es el flujo de destilación (Q_X) que se requiere para mantener el equilibrio de concentración de nutrientes en el sistema hidropónico. Para esto, la ecuación. 8.6 se resuelve para Q_X en los siguientes pasos:

$$(\rho_{RAS} \times Q_X) = (\rho_{PH} \times Q_{PH}) - (\rho_{MIN} \times Q_{MIN}) - (\rho_{RAS} \times Q_{PH}) + (\rho_{RAS} \times Q_{MIN}) \quad (8.7)$$

$$Q_X = \frac{\rho_{HP} \times Q_{HP}}{\rho_{RAS}} \quad \frac{\rho_{MIN} \times Q_{MIN}}{\rho_{RAS}} - Q_{HP} + Q_{MIN} \quad (8.8)$$

Tenga en cuenta que el flujo de destilación Q_X es altamente dinámico y depende de la velocidad de evaporación y transpiración de las plantas, que depende del clima. Sin embargo, el resultado dinámico se puede usar para dimensionar la unidad de destilación. Para calcular el flujo de entrada requerido en la unidad de destilación, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Q_{DIS} = Q_x \times \frac{100}{\eta_{DIS}} \quad (8.9)$$

donde Q es el volumen de flujo en L y η la eficiencia de desmineralización del dispositivo utilizado (en %).

La tecnología de destilación puede por lo tanto reducir drásticamente el agua y el medio ambiente. (es decir, el uso de fertilizantes) huella de los sistemas de acuaponía de circuito múltiple. Sin embargo, los sistemas de acuaponía se vuelven aún más complejos cuando se considera su implementación. Aunque este ciclo adicional podría no tener sentido para los sistemas a pequeña escala, tiene el potencial de llevar los sistemas

comerciales más grandes a un nuevo nivel. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la tecnología de destilación térmica requiere grandes cantidades de energía térmica y podría no ser económicamente razonable en todas partes. Las regiones con altos niveles globales de radiación solar o fuentes de energía geotérmica podrían ser las más adecuadas para esta tecnología. La sostenibilidad económica de tales sistemas también depende de la ubicación.

Otro punto a tener en cuenta es la alta temperatura del agua destilada y la salmuera de la unidad de destilación. Dependiendo de las condiciones ambientales y las especies de peces utilizadas, el agua de destilación caliente podría usarse para calentar el agua RAS; Sin embargo, la salmuera debe enfriarse antes de volver a ingresar al subsistema HP.

8.4 DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE MÚLTIPLES BUCLES

El dimensionamiento de un sistema de acuaponía requiere equilibrar la entrada y salida de nutrientes. Aquí, básicamente aplicamos el mismo principio que dimensionar un sistema de un bucle. Sin embargo, este enfoque es un poco más complicado, pero se ilustrará completamente con la ayuda de un ejemplo. La Figura 8.5 ilustra el diagrama de balance de masa para nuestro enfoque de sistema. En la situación óptima, el sistema solo tiene una entrada y salida. Sin embargo, en la práctica, uno tendrá que

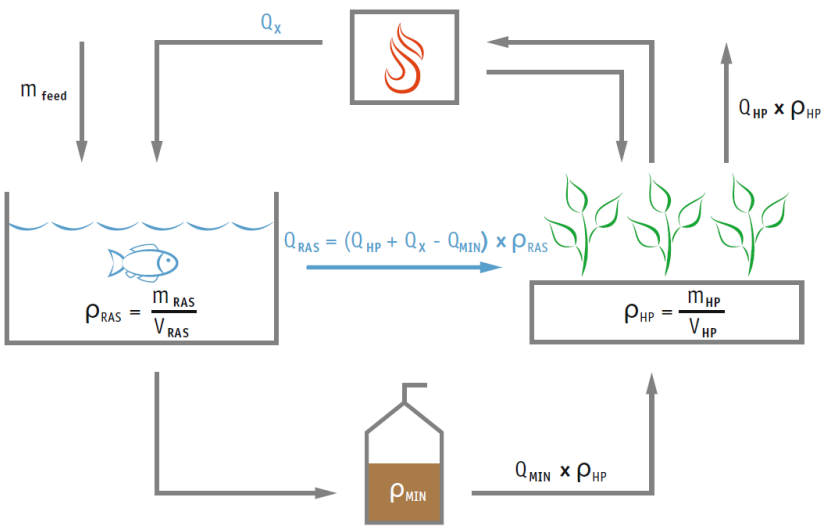


Fig. 8.5 Esquema que muestra el balance de masa dentro de un sistema de acuaponía de cuatro bucles; donde mfeed son los nutrientes disueltos agregados al sistema a través de la alimentación. Agregue etiquetas: Q_{DIS} - Q_X para destilar devuelto a HP; "Lodo" para nutrientes que entran al reactor.

agregar nutrientes adicionales a la parte hidropónica para optimizar el crecimiento de la planta. Este modelo se puede usar para dimensionar el sistema, p. basado en fósforo, que es un recurso no renovable (cap. 2).

La entrada al sistema ($m_{alimentación}$) es la fracción de un nutriente que los peces excretan en forma disuelta. El resto se acumula en los peces como biomasa o termina como lodo (ver sección anterior). La salida es la absorción de nutrientes de la planta. La determinación de la absorción de nutrientes de las plantas depende de muchos factores y es muy compleja; La forma más fácil de dar una estimación aproximada es considerar la respiración de las plantas como el principal impulsor de la absorción de nutrientes (Goddek y Körner 2019).

La tasa de evapotranspiración depende en gran medida del clima y está influenciada directa o indirectamente por la radiación de onda corta absorbida, la humedad relativa, la temperatura y la concentración de CO_2. Debido a la alta complejidad de un sistema de múltiples bucles, suponemos que las plantas están ubicadas en un invernadero con clima controlado y, por lo tanto, solo necesitamos considerar la radiación global como la variable dinámica que determina cuánta radiación de onda corta se absorbe. En otras palabras, primero necesitamos determinar qué cantidad de nutrientes agregados están disponibles para las plantas, y luego determinar cuánto absorben las plantas.

8.4.1 Entrada de Alimentación

La tasa de alimentación de peces depende de la biomasa total en el sistema y la relación de conversión de alimentación (FCR). Timmons y Ebeling (2013) proporcionan un enfoque simple para determinar las tasas de crecimiento de peces para diferentes especies de peces. Sin embargo, recomendamos tomar datos industriales para determinar la biomasa con mayor precisión. Lupatsch y Kissil (1998) (Ec. 8.10) proporcionan una fórmula de crecimiento general, para la cual Goddek y Körner (2019) determinaron los coeficientes de crecimiento mediante ajuste de curvas utilizando el entorno matemático de software MATLAB (función interna 'fitnlm') con datos empíricos para el Nilo tilapia (*Oreochromis niloticus*). Pesos iniciales y finales adicionales, agua temperatura del sistema, y la salida para los coeficientes de crecimiento específicos de la especie se pueden encontrar en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2 Parámetros de crecimiento de peces para la Ec. 8.10 para una temperatura del agua dada (T). W_0 y W_f se pueden ajustar a las necesidades propias.

Función	Parámetros	Descripción	Valor	Fuente
Crecimiento del pez	W_0	Peso Inicial de los alevines de tilapia (en g)	Por ejemplo, 55	Goddek and Körner (2009)
	W_f	Peso objetivo de la cosecha del pez (en g)	Por ejemplo, 600	Goddek and Körner (2019)
	T	Temperatura del agua del RAS (en C)	30	Timmons and Ebeling (2013)
	αw; βw; γw	Coeficientes de crecimiento específicos de la especie	0,0261; 0,4071; 0,0827	Goddek and Körner (2019)

Insertar estos parámetros en la ecuación. 8.10 nos da el peso en un día específico para esta especie de peces.

$$Wt=[W_0^{1-\beta w} + (1-\beta w)\alpha_w \exp\{\gamma_w T\}\, t]^{\frac{1}{1-\beta w}} \quad (8.10)$$

donde Wt (g) es el peso del pez en un momento específico (días), W0 (g) es el peso del pez inicial, T es la temperatura del agua (en ℃), αw βw y γw son coeficientes de crecimiento específicos de la especie (sin unidades), y t es el tiempo en días.

Con base en el resultado de la ecuación anterior, pudimos determinar qué cantidad de alimento requerirán los peces por etapa de crecimiento. La mayoría de las veces, la tasa de alimentación (X% del peso corporal) o FCR es mencionada por el fabricante específico de la especie. Sin embargo, Timmons y Ebeling (2013) proporcionan una guía aproximada para FCR para tilapia: 0,7–0,9 para tilapia que pesan menos de 100 g y 1,2–1,3 para tilapia que pesan más de 100 g. Esto se hace a través de la siguiente ecuación.

$$\text{Ración de alimento (g)} = \text{FCR} \times (WG_t \times m_{fish}) \quad (8.11)$$

donde FCR es la proporción de conversión de alimento, WGt es el aumento de peso (por día), y el pez es la cantidad de peces en el tanque.

El aumento de peso (WG) por día se puede determinar con la ecuación. 8.10 restando el peso de, p. día 10 del peso del día 11. Esto se puede hacer para cada tanque. La Figura 8.6 muestra la entrada de alimentación de peces al sistema para tilapia usando las ecuaciones anteriores. El promedio de entrada de alimento por día después de que el sistema está totalmente ciclado es de 165 kg.

8.4.2 Disponibilidad de Nutrientes

Neto y Ostrensky (2013) informan una excreción de N soluble del 33% y

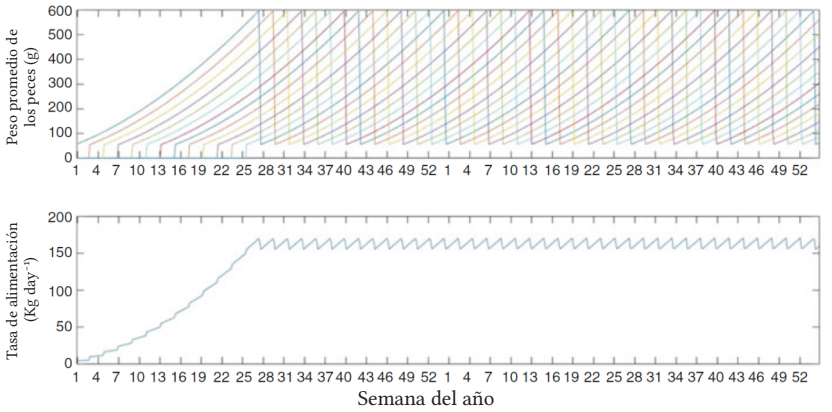


Fig. 8.6 Ejemplo de balance de biomasa para tilapia criada en 13 tanques en cohortes con un volumen total (incluyendo biofiltro y sumidero) de 482,000 L a un máximo. Biomasa total de 80 t durante un período de 2 años, incluida la fase de arranque con un peso promedio de los peces (a) (cada línea representa un tanque / cohorte) y la tasa de alimentación total diaria (b) (datos tomados de Goddek y Körner 2019).

una P soluble excreción del 17% de la entrada de alimento al criar tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*, L.).

Estos son los nutrientes que finalmente se acumulan en el sistema RAS y pueden ser absorbidos por las plantas.

8.4.3 Absorción de la planta

La Tabla 8.3 ofrece una visión general de las tasas de evapotranspiración (ETc) específicas del cultivo que están vinculadas a la radiación global. Un mm de ET por metro cuadrado equivale a 1 L. Para un tamaño simple, se debe tomar el promedio diario anual (consulte la siguiente sección).

8.4.4 Balanceando los subsistemas

El equilibrio de los bucles es necesario para dimensionar el sistema. La entrada debe ser igual a la salida (Fig. 8.5). En un sistema de acuaponía desacoplado que incorpora una unidad de biorreactor, tenemos dos corrientes de entrada de nutrientes: (1) la fracción de alimento que se excreta al sistema RAS en forma soluble y (2) la fracción de nutrientes en el lodo de peces que los biorreactores logran mineralizarse y movilizarse. La principal corriente de salida (aparte de la eliminación periódica de lodo desmineralizado) de nutrientes es la absorción de nutrientes de las plantas.

La ecuación diferencial. 8.12. expresa este equilibrio:

Tabla 8.3 Descripción general de los niveles de radiación global exterior condiciones subárticas, marinas templadas y áridas (según Goddek y Körner 2019) y sus respectivas tasas de evapotranspiración de los cultivos (ETc, *mm día*$^{-1}$) para *lechugas* y *tomates* cultivados en un ambiente de invernadero controlado de 20 C y 80% de humedad relativa. La lechuga se cultivó con plantación continua durante todo el año; el tomate se plantó en enero y se retiró en diciembre (Islas Feroe y Países Bajos) o julio y junio (Namibia)

	Islas Faroe			Los Países Bajos			Namibia		
Mes	**Radiación Global**	**ETc/lechuga**	**ETc/tomate**	**Radiación Global**	**ETc/lechuga**	**ETc/tomate**	**Radiación**	**ETc/lechuga**	**ETc/tomate**
	mol m^{-2} day^{-1}	**kg m^{-2} day^{-1}**		**mol m^{-2} day^{-1}**	**kg m^{-2} day^{-1}**		**mol m^{-2} day^{-1}**	**kg m^{-2} day^{-1}**	
Enero	1.4	0.78	0.52	4.5	0.78	0.53	54.2	2.74	4.55
Febrero	5.2	0.85	1.38	9.1	0.93	1.40	53.7	2.70	4.47
Marzo	13.7	1.20	2.12	17.0	1.28	2.14	51.2	2.42	3.96
Abril	30.6	1.90	3.05	27.9	1.82	2.90	40.2	3.05	5.38
Mayo	39.2	2.29	3.57	32.2	2.40	3.74	30.0	2.70	4.59
Junio	39.6	2.33	3.60	36.6	2.52	3.91	30.5	2.28	3.80
Julio	34.5	2.17	3.37	36.4	2.54	3.94	32.1	2.40	1.76
Agosto	21.3	1.67	2.73	31.7	2.28	3.51	37.5	2.61	3.92
Septiembre	13.2	1.20	2.04	23.1	1.75	2.77	43.2	2.00	3.02
Octubre	6.0	0.91	1.77	13.3	1.17	1.94	51.6	2.07	3.09
Noviembre	2.1	0.78	1.60	6.2	0.87	1.62	57.9	2.30	3.58
Diciembre	0.4	0.79	1.66	3.5	0.77	1.52	59.8	2.44	3.95
Promedio	**17.3**	**1.41**	**2.28**	**20.6**	**1.59**	**2.50**	**45.6**	**2.47**	**3.83**

$$\text{Mineralización (Ec. 8.2)} + \underline{m}_{\text{alimento}} = \frac{Q_{HP} \times \rho_{HP}}{1000} \quad (8.12)$$

$$(n_{\text{alimentación}} \times 1000 \times \pi_{\text{alimentación}} \times \pi_{\text{lodos}} \times \eta_{\text{min}}) + m_{\text{alimentación}} \quad (8.13)$$

donde $n_{\text{alimentación}}$ es el alimento promedio (en kg) que ingresa al sistema RAS, $\pi_{\text{alimentación}}$ es la proporción del nutriente en la formulación del alimento, π_{lodos} es la proporción de un elemento específico derivado del alimento que termina en el lodo, y η_{min} es la mineralización y eficiencia de movilización del sistema de reactores, $m_{\text{alimentación}}$ es la cantidad promedio de un nutriente que los peces defecan en forma disuelta, Q_{HP} es la evapotranspiración total promedio y ρ_{HP} es la concentración de nutrientes objetivo (es decir, óptima) para un nutriente específico en el subsistema hidropónico. Sin embargo, para poder determinar el área requerida, hay dos variables que necesita redefinirse para resolver esta ecuación. La ecuación 8.14 muestra cómo calcular la excreción de nutrientes solubles. En la ecuación 8.15, mostramos que la evapotranspiración total promedio es un producto del área y la tasa de evapotranspiración específica de la planta (aquí se muestra como un promedio) por m^2.

$$m_{\text{alimentación}} = n_{\text{alimentación}} \times \pi_{\text{alimentación}} \times \eta_{\text{excr}} \quad (8.14)$$

donde η_{excr} representa la fracción del nutriente excretado por los peces en forma soluble.

$$\underline{Q}_{HP} = A \times ETc \quad (8.15)$$

donde $\underline{Q}_{HP}$ representa la evapotranspiración total promedio (en L), A el área y ETc la evapotranspiración específica del cultivo promedio en mm/m^2 (es decir, L/m^2).

Resolviendo la ecuación 8.13 incorporando las ecuaciones. 8.14 y 8.15 para encontrar A, podemos calcular el área de planta requerida con respecto a la entrada promedio de alimento (Ec. 8.15).

$$A = \frac{(n_{\text{alimentación}} \times 1000 \times \pi_{\text{alimentación}} \times \eta_{\text{excr}} \times 1000) + (\underline{n}_{\text{alimentación}} \times 1000 \times \pi_{\text{alimentación}} \times \pi_{\text{lodos}} \times \eta_{\text{min}} \times 1000)}{ETc \times \rho_{HP}} \quad (8.16)$$

Por ejemplo 8.2
Para este ejemplo, queremos dimensionar (es decir, equilibrar) el sistema con respecto a P. Suponemos que el componente RAS de nuestro sistema requiere una entrada de alimentación diaria promedio de 150 kg. El fabricante informa que el contenido de P del alimento para peces es del 1%. Estimamos que el P que termina en el lodo es del 55% y el P que excreta en forma soluble es del 17%. Los biorreactores funcionan bastante bien y mineralizan alrededor del 85% de la P.

En el lado de la producción, calculamos la tasa promedio de evapotranspiración específica del cultivo para la lechuga (por ejemplo, utilizando la ecuación Penman-Monteith de la FAO). En nuestra ubicación, es de alrededor de 1.3 mm / día (es decir, 1.3 L/día). Se informa que la composición de P óptima de la solución nutritiva es de 50 mg / L (Resh 2013). A continuación, se resuelve encontrar el área de cultivo de plantas necesaria para absorber la P producida por el sistema:

$$A = \frac{(n_{alimentación} \times 1000 \times \pi_{alimentación} \times \eta_{excr} \times 1000) + (n_{alimentación} \times 1000 \times \pi_{alimentación} \times \pi_{lodos} \times \eta_{min} \times 1000)}{ETc \times \rho_{HP}}$$

$$A = \frac{(150000 \times 0.01 \times 0.17 \times 1000) + (150000 \times 0.01 \times 0.55 \times 0.85 \times 1000)}{1.3 \times 50}$$

$$A = \frac{255000 + 701250}{65}$$

$$A = 14711 m^2 = 1.47 \text{ ha}$$

El ejemplo anterior muestra que la mayoría del P en la unidad hidropónica se origina en los biorreactores. Por lo tanto, la implementación de un biorreactor dentro de un sistema desacoplado tiene un impacto muy alto en la sostenibilidad de P. Por el contrario, para dimensionar los sistemas de acuaponía simples de un bucle, generalmente se aplica una regla general. Para plantas frondosas aprox. 40–50 g y para plantas frutales aprox. Se requieren 50–80 g de alimento por m^2 de área de cultivo (FAO 2014). Al observar la entrada de alimento en el ejemplo dado arriba de =150 kg, y dividirlo por 45 (el promedio de la aproximación de la planta frondosa), el área de cultivo propuesta es de alrededor de 3.750m^2. Dejando de lado la mineralización de lodos, nuestro ejemplo sugeriría un área de cultivo de 3.333m^2 al dimensionar el sistema en P.

8.4.5 rol de la unidad de destilación

El papel de la unidad de destilación es mantener la concentración de nutrientes del sistema RAS y el sistema hidropónico en sus respectivos niveles deseados. Dado que la acumulación de nutrientes y la densidad de nutrientes específica correspondiente son dinámicos en los sistemas RAS (es decir, dependiendo de las tasas de ETc) que dependen del flujo Q_{HP} y Q_X (Fig. 8.5), el tamaño de la unidad de destilación no se puede determinar utilizando una ecuación diferencial.

Por lo tanto, se requiere un modelo de serie temporal para determinar la concentración de nutrientes en el RAS a lo largo del tiempo. La concentración de nutrientes en un momento específico es necesaria para poder ejecutar ecuaciones de balance de masa dentro del sistema (Sección

8.3). Para que el sistema esté equilibrado (es decir, entrada = salida), podemos dar una pauta general sobre la capacidad requerida de dicha unidad de destilación. El objetivo es evitar la acumulación de nutrientes en el sistema RAS. La Figura 8.7a, b muestra el impacto de los flujos de destilación en la solución de nutrientes hidropónicos y RAS *sin un circuito de mineralización en dos latitudes diferentes*. Ambos sistemas tienen la misma entrada de alimento (en promedio 158,6 kg día-1; ver Fig. 8.6). Sin embargo, al tener en cuenta las condiciones ambientales y los invernaderos ajustados al clima, el área hidropónica necesaria y óptima difiere entre las ubicaciones geográficas (ver Cap. 11). Los sistemas hidropónicos con tasas de evaporación de potencial bajo, como son comunes en ubicaciones en latitudes altas (es decir, lejos del ecuador) necesitarían áreas de cultivo más grandes en lugares más cercanos al ecuador. Al mismo tiempo, una variación anual más alta en la irradiación y, por lo tanto, la transpiración es común en estas regiones, por lo tanto, existe una mayor demanda de variabilidad estacional en el agua y los nutrientes (ver Fig. 8.7). Sin embargo, en el cultivo en invernadero, puede ser necesaria la iluminación suplementaria, y en países como Noruega, el cultivo de hortalizas sin iluminación complementaria apenas tiene lugar. Además, la superficie total de la hoja del cultivo hace la diferencia; los cultivos con un área foliar alta por unidad de área de suelo (es decir, índice de área foliar) transpiran más que los cultivos con áreas foliares más pequeñas, y se puede ver una clara diferencia entre los cultivos de tomate y lechuga. Todos estos factores deben

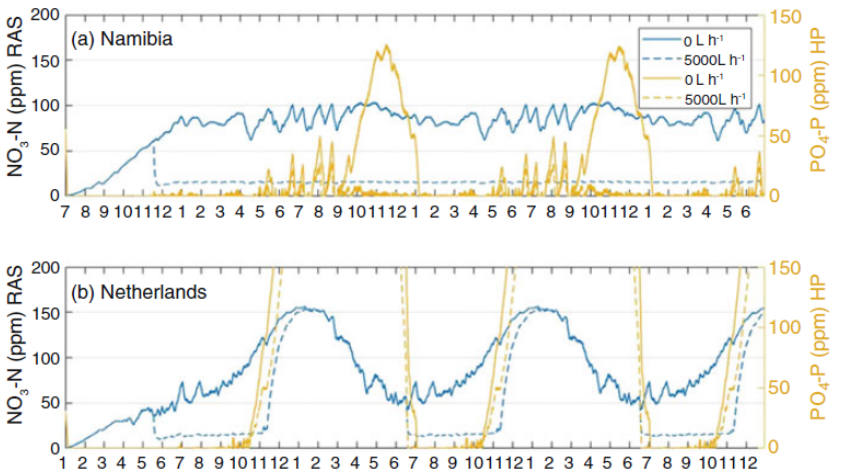


Fig. 8.7 Simulaciones que comparan la concentración de NO_3-N en el sistema de agua RAS sobre el impacto de los flujos de destilación (no, línea continua; 5000 L h-1, línea discontinua) en hidroponía (amarillo, ---) y RAS (azul, - -) concentraciones de solución de nutrientes en (a) Namibia y (b) los Países Bajos, es decir, en latitudes bajas y altas (Namibia 22.6 °S y Países Bajos, 52.1° N, respectivamente) dentro de un período de 36 meses (incluyendo la puesta en marcha del sistema fase) utilizando datos climáticos locales e invernaderos ajustados al clima como entrada del modelo.

tenerse en cuenta al planificar y dimensionar el sistema acuapónico.

A continuación, ofrecemos una descripción general del tamaño del área hidropónica optimizada para los sistemas de acuaponía descritos anteriormente: El área de cultivo para monocultivos simulados con escenarios en pasos de 250m^2 para encontrar el área de ajuste de lechuga o tomate para equilibrar el sistema de manera adecuada estaba sin *iluminación suplementaria* (para lechuga o tomate, respectivamente):

17.000 m^2 o 11.750 m^2 para Islas Faroe
15.500 m^2 o 11.000 m^2 para los Países Bajos
8.750 m^2 o 6.500 m^2 para Namibia

Aunque el tamaño de los sistemas difiere, la absorción anual promedio de nutrientes es similar. Sin embargo, al integrar un sistema digestor, tenemos que tener en cuenta la fuente adicional de nutrientes (Fig. 8.1c). Cambiar un componente inevitablemente conduce a desequilibrios del sistema, sin embargo, el sistema debe apuntar a proporcionar nutrientes óptimos tanto para RAS como para HP. Por ejemplo, NO3-N en RAS debe estar por debajo de un cierto umbral <200 mg L^{-1} para, p. tilapia, mientras que PO4-P en HP debe estar lo más cerca posible de la concentración recomendada de 50 mg L^{-1} para el cultivo de plantas de buena calidad. Por lo tanto, los estudios de simulación ayudan a determinar el tamaño de los componentes en un sistema de acuaponía de múltiples bucles cerrado desacoplado para lograr suministros óptimos de nutrientes tanto para peces como para plantas. Para ese propósito, Goddek y Körner (2019) crearon un simulador numérico de acuaponía.

Sin embargo, la planificación de un sistema de acuaponía implica una comprensión básica del sistema para alcanzar un equilibrio que minimice los picos no deseados en la demanda y oferta de nutrientes. Dado que la fuerza impulsora de la dinámica de los nutrientes es la evapotranspiración del cultivo (ETc en el sistema HP), esto es impulsado en gran medida por el microclima y la luz absorbida. En un sistema perfectamente equilibrado, este sería un entorno totalmente automatizado y controlado (ver Sección 8.5 Monitoreo y control) con iluminación de 24 h. Las plantas necesitan un cierto período oscuro de aproximadamente 4–6 h, por lo que el sistema mejor equilibrado es llevar a cabo una acuaponía de manera realista en fábricas de plantas cerradas únicamente con fuentes de luz artificial. Sin embargo, esto exige altos costos de inversión y entrada eléctrica y solo es factible con precios de producto muy altos. Por lo tanto, recomendamos la producción en invernadero con iluminación suplementaria (si es necesario y vale la pena) como una forma práctica y económicamente viable de construir una unidad de acuaponía. Colocar ambas plantas y peces en la

misma construcción física da como resultado sinergias adicionales que incluyen un calentamiento reducido y un mayor crecimiento de la planta a través de CO_2 elevado (Körner et al. 2017).

Además de estos problemas técnicos, los procedimientos de cultivo de plantas (la parte hortícola práctica del sistema) deben ajustarse a las necesidades de la acuaponía, de modo que haya una demanda constante de nutrientes del cultivo (suponiendo el mismo clima y luz) como se muestra en la Tabla 8.3. El cultivo de lechuga y otras verduras de hoja verde se lleva a cabo de forma continua (Körner et al.2018), mientras que los cultivos más grandes, como hortalizas de frutas como el tomate, el pepino o el pimiento dulce, generalmente se siembran en invierno, y la primera cosecha a menudo es tardía invierno / principios de primavera seguido de la eliminación de plantas y otra cosecha sembrada para la cosecha en invierno nuevamente. Sin interpretación, es decir, varios tipos de cultivos en el mismo sistema o lotes de hortalizas frutales plantados durante todo el año para mantener la demanda de nutrientes, se producirán períodos de baja demanda de nutrientes y altos niveles de nutrientes. Basado en Gooddek y Körner (2019), mostramos la variación de NO3-N en RAS para tomate) a menudo no ajustado en acuaponía) y lechuga cuando no se usa iluminación suplementaria para tres zonas climáticas (Islas Ferie, Países Bajos, y Namibia) (Fig. 8.8). El equilibrio del Sistema se puede lograr aumentado la luz integral diaria (es decir, la suma de la luz mola recibida durante un período de 24 h) con control de iluminación suplementario dinámico (Körner et al. 2006).

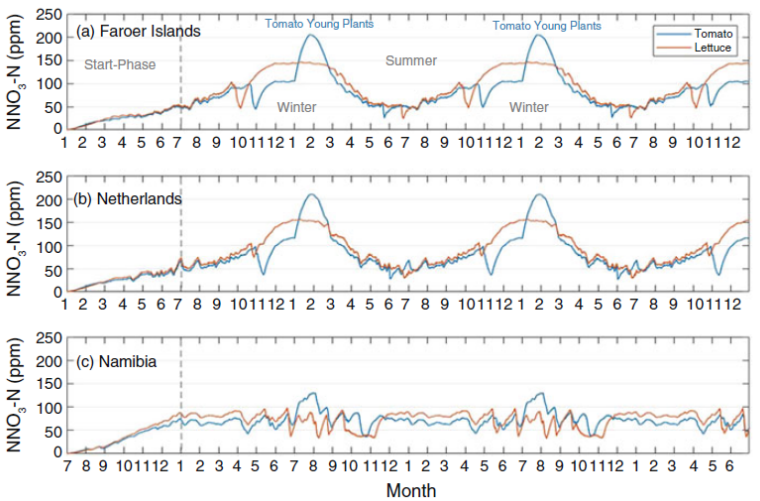


Fig. 8.8 NO3-N en RAS combinado con HP cultivando tomate o lechuga en tres zonas climáticas y latitudes decrecientes (Islas Feroe 62.0 N, Países Bajos 52.1 N, Namibia 22.6 S) con área optimizada para cultivos hidropónicos (ver arriba) en un Simulación de 36 meses utilizando datos climáticos locales e invernaderos ajustados al clima como entrada del modelo.

La aplicación de tecnologías de destilación/desalinización puede contribuir a reducciones significativas en los niveles de nutrientes en el RAS al tiempo que ajusta los niveles en el sistema HP más cerca de los óptimos, es decir, la unidad concentra los nutrientes a los niveles requeridos por las plantas. La figura 8.9 ilustra el efecto de una unidad de desalinización sobre la concentración de RAS NO3-N cuando se aplica entre 0 y 5000 L/h^{-1} y el $sistema^{-1}$. Es obvio que al aumentar el flujo de desalinización, la concentración de NO3-N en el sistema RAS está disminuyendo. Sin embargo, la unidad está controlada por la demanda de PO4 en el sistema HP. Deben evitarse los picos y, como se indicó anteriormente, esto puede lograrse creando un entorno climático estable con controles dinámicos de luz. Es obvio que, en las regiones climáticas con menos diferencias anuales en la radiación solar, hay menos variación en ETc y el sistema completo es más estable. Instalar lámparas y mantener una luz diaria integral de al menos 10 mol m^{-2} puede compensar las variaciones estacionales.

La producción de cultivos mixtos y entre plantas ayuda a nivelar el pico resultante del protocolo tradicional de cultivo de tomate con plantas jóvenes en invierno cuando tanto el clima (baja radiación) como el cultivo (plantas pequeñas, ETc de Bajo potencial) contribuyen a la acumulación de nutrientes.

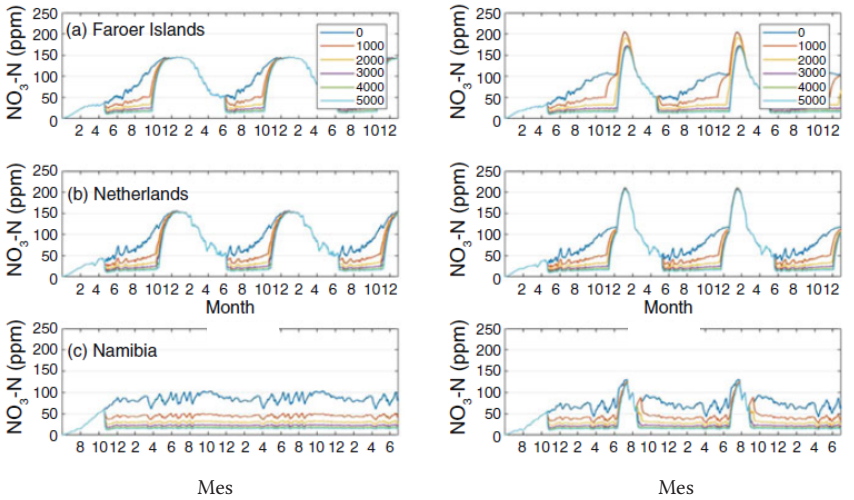


Fig. 8.9 NO3-N en RAS combinado con HP con tomate (derecha) o lechuga (izquierda) con desalinización entre 0 y 5000 L/h-1 en tres zonas climáticas y latitudes decrecientes (Islas Feroe 62.0 N, Países Bajos 52.1 °N, Namibia 22.6 °S) con área ajustada para HP (ver arriba) en una simulación de 36 meses utilizando datos climáticos locales e invernaderos ajustados al clima como entrada del modelo.

8.5 MONITOREAR Y CONTROLAR

En el control de retroalimentación clásico, como el control PI o PID (Proporcional-Integral-Derivado), las variables controladas (CV) se miden directamente, se comparan con un punto de ajuste y, posteriormente, se retroalimentan al proceso mediante una ley de control de retroalimentación. En la figura 8.10, las señales, sin el argumento del tiempo, se denotan con una letra minúscula, donde y es la variable controlada (CV) que se compara con la señal de referencia (punto de ajuste) *r*. El error de seguimiento ε (es decir, *r- y*) se alimenta al controlador, ya sea en hardware o software, desde el cual se genera la entrada de control *u*, también conocida como la variable manipulada (MV). La entrada u afecta directamente el proceso (*P*) del que resulta una salida (*y*). La salida muestreada se compara posteriormente con *r*, que cierra el ciclo. En la práctica, este ciclo continúa hasta que el controlador se apaga. Existe una extensa literatura sobre control de retroalimentación (Doyle et al. 1992; Morris 2001; Ogata 2010), y esto ha sido objeto de investigación durante muchos años, comenzando con los trabajos de Bode (1930) y Nyquist (1932).

En RAS, los CV típicos son temperatura, pH y concentración de oxígeno disuelto (OD), para lo cual existen sensores confiables. En consecuencia, el control de retroalimentación de estos parámetros de calidad del agua se puede realizar fácilmente.

Sin embargo, en la práctica, con mayor frecuencia, las señales de entrada y salida se ven perturbadas por procesos de ruido, como entradas aleatorias desconocidas y ruido de medición. Además, el proceso general (*P*) puede cambiar con el tiempo como resultado del crecimiento, la maduración, la senescencia, etc. El alimento para peces es otro aporte al RAS y su efecto sobre el crecimiento de los peces no puede verse ni medirse directamente. Para estos parámetros, los controladores basados en modelos (por ejemplo, feedforward, modelo predictivo y control óptimo) se introducen típicamente para predecir la respuesta de un cambio en la entrada de control. Sin embargo, la alimentación de peces se agrega comúnmente sobre la base de valores encontrados en tablas o recetas, pero este control basado en reglas

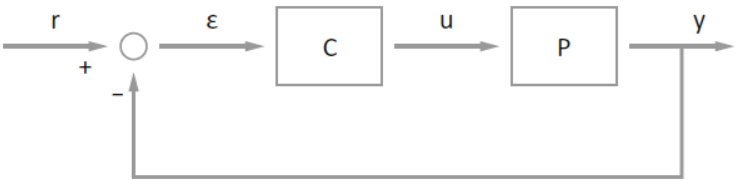


Fig. 8.10 Control de retroalimentación con controlador (C) y proceso (P). r señal de referencia, error de seguimiento de eps, u señal de entrada, y salida sigma.

puede necesitar algún ajuste en la práctica real para actuar como un controlador de retroalimentación. Los comportamientos de los peces en RAS son una medida clásica de control de retroalimentación ya que los peces reaccionan fisiológicamente a los cambios ambientales con variaciones en el movimiento, la ubicación, la receptividad a la alimentación, etc.

La producción hidropónica generalmente tiene lugar en entornos protegidos, como invernaderos o fábricas de plantas, donde es necesario controlar tanto el entorno de la raíz como el aéreo. Los controladores de encendido y apagado que modelan de manera predictiva los entornos aéreos óptimos han demostrado ser superiores en la investigación experimental, pero la comercialización ha sido lenta, mientras que los controladores de retroalimentación son estándar en la mayoría de los invernaderos con clima controlado. Sin embargo, el actuador varía con el tipo de controlador con válvulas de calefacción y respiraderos típicamente controlados por retroalimentación, pero la iluminación generalmente tiene un mecanismo de encendido y apagado y solo unos pocos son regulables. Los controladores que dependen del sensor o la entrada de datos pueden responder al rápido crecimiento en un entorno protegido y dar como resultado productos de alta calidad con altos precios de mercado que mejoran sus beneficios de costos. Muchos invernaderos comerciales todavía tienen el sensor clásico ubicado en el centro colgando 1–2 m sobre el cultivo y todavía cubre varios cientos de metros cuadrados, pero se están introduciendo múltiples sensores inalámbricos que cubren áreas más pequeñas, aunque muchos de los datos detallados no se pueden usar porque Grandes zonas climáticas están controladas por los mismos actuadores. Los avances en la tecnología de sensores (por ejemplo, sensores de temperatura de microclima, procesadores de imágenes, intercambio de gases en tiempo real o mediciones de fluorescencia de clorofila) conectados al software de modelado podrían usar sistemas de soporte de decisiones y convertirse en sistemas de control automatizados.

En los sistemas de biorreactor típicos, la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto en los sistemas aireados y los flujos de gas en los sistemas anaeróbicos se miden y ajustan continuamente con los controladores disponibles de temperatura, pH y Oxígeno disuelto. Además de esto, los tiempos tanto hidráulicos (HRT) como de retención de lodos (SRT) también se establecen con frecuencia mediante el control de los flujos de agua (residuos) y de la biomasa, respectivamente.

8.6 IMPACTO ECONÓMICO

Las tecnologías que generan menos ganancias, pero son mejores para el

medio ambiente, generalmente solo se implementan cuando los operadores reciben un incentivo en forma de subsidios o las políticas los obligan a hacerlo. En el caso de los sistemas de acuaponía de un circuito, el atractivo radica en la nueva tecnología y el enfoque del sistema para el uso sostenible de los recursos en lugar de su potencial económico. Sin embargo, publicaciones recientes proporcionan evidencia de ganancias en la producción: las verduras de hoja verde crecen mejor en ambientes desacoplados que en sistemas hidropónicos estériles (Delaide et al.2016; Goddek y Vermeulen 2018) y la lechuga en sistemas acuapónicos desacoplados tuvo una ventaja de crecimiento de aproximadamente 40% en comparación con los enfoques hidropónicos de vanguardia.

A pesar de que se pueden esperar tasas de crecimiento más altas, los sistemas de acuaponía de circuito múltiple son aún mucho más complejos que los sistemas hidropónicos y se requieren inversiones iniciales significativas para la implementación. La mayoría de las ubicaciones geográficas requieren un invernadero de alta tecnología para controlar las condiciones ambientales (es decir, una humedad relativa del 80%, temperaturas constantes de alrededor de 20°C). Las fuentes de energía renovables se pueden usar para enfriar y calentar, pero actualmente estos sistemas solo son rentables cuando se configuran a gran escala (es decir,> 1 ha) donde prevalecen las buenas condiciones del mercado.

8.7 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Según el ejemplo 8.2, existe evidencia de que el tratamiento de lodos en digestores puede tener un impacto beneficioso en la reutilización de nutrientes, especialmente el fósforo. Los sistemas de biorreactor, como un sistema de reactor UASB secuencial de dos etapas, pueden aumentar la eficiencia del reciclaje de fósforo hasta un 300% (cap. 10). Anteriormente, en el cap. 2, discutimos la paradoja del fósforo en relación con la escasez de fosfato y los problemas con la eutrofización. Los biorreactores tienen ventajas significativas para una mayor recuperación de nutrientes de los lodos, lo que ayuda a cerrar el ciclo del ciclo de nutrientes dentro de los sistemas de acuaponía. Sin embargo, se necesita más investigación para refinar tales sistemas para optimizar la biodisponibilidad de nutrientes específicos. Las figuras 8.11, 8.12 y 8.13 muestran los flujos de entrada, salida y desechos de los sistemas independientes de acuicultura e hidroponía en comparación con un sistema de acuaponía desacoplado. Se puede ver que el enfoque desacoplado constituye un concepto agrícola prometedor para un sistema de reducción y reciclaje de residuos.

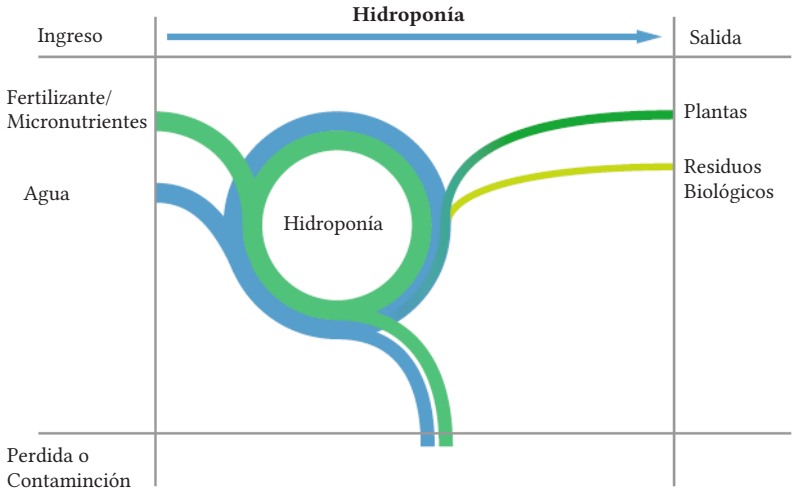


Fig. 8.11 Flujos de entrada, salida y pérdida en un sistema hidropónico independiente

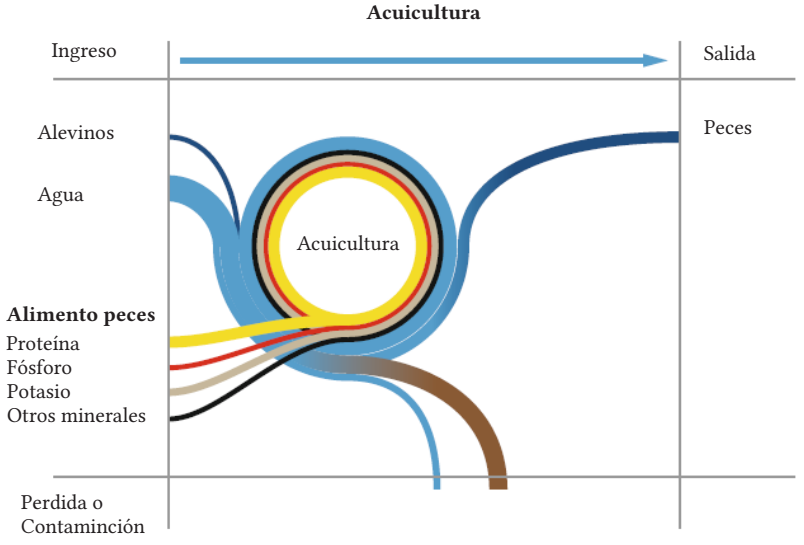


Fig. 8.12 Flujos de entrada, salida y pérdida en un sistema de acuicultura independiente

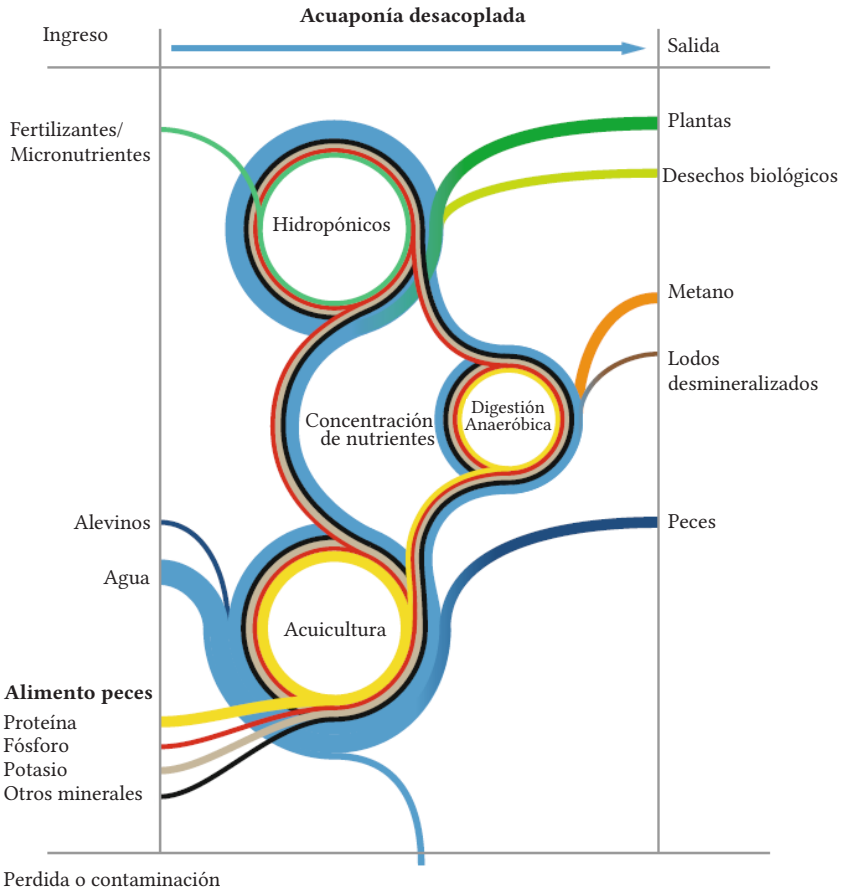


Fig. 8.13 Flujos de entrada, salida y pérdida en un sistema de acuaponía de múltiples bucles desacoplado que comprende un sistema de reactor anaeróbico.

Referencias

Alvarez R, Lidén G (2008) The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude. Bioresour Technol 99:7278–7284. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.055

Bode HW (1930) A method of impedance correction. Bell Syst Tech J 9:794–835. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1930.tb02326.x

Coghlan SM, Ringler NH (2005) Temperature-dependent effects of rainbow trout on growth of Atlantic Salmon Parr. J Great Lakes Res 31:386–396. https://doi.org/10.1016/S0380-1330(05) 70270-7

Dalsgaard J, Lund I, Thorarinsdottir R, Drengstig A, Arvonen K, Pedersen PB (2013) Farming different species in RAS in Nordic countries: current

status and future perspectives. Aquac Eng 53:2–13
Davidson J, Good C, Welsh C, Summerfelt ST (2011) Abnormal swimming behavior and increased deformities in rainbow trout Oncorhynchus mykiss cultured in low exchange water recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 45:109–117
De Lemos Chernicharo CA (2007) Anaerobic reactors, 4th edn. IWA Publishing, New Delhi
Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli M (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water 8:467. https://doi.org/10.3390/w8100467
Delaide B, Goddek S, Keesman KJ, Jijakli MH (2018) Biotechnologie, agronomie, société et environnement ¼ Biotechnology, agronomy, society and environment: BASE. https://popups. uliege.be:443/1780-4507 22, 12
Doyle JC, Francis BA, Tannenbaum A (1992) Feedback control theory. Macmillan Pub. Co
El-Sayed A-FM (2006) Tilapia culture. CABI Publishing, Oxfordshire
Emerenciano M, Carneiro P, Lapa M, Lapa K, Delaide B, Goddek S (2017) Mineralizacão de sólidos. Aquac Bras: 21–26
FAO (2005) Cultured aquatic species information programme. Oncorhynchus mykiss. [WWWDocument]. FAO Fish. Aquac. Dep. [online]. URL http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oncorhynchus_mykiss/en. Accessed 21 Sep 2015
FAO (2014) Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. FAO, Rome
Goddek S (2017) Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems. Wageningen University, Wageningen. https://doi.org/10.18174/412236
Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024
Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143–154
Goddek S, Vermeulen T (2018) Comparison of Lactuca sativa growth performance in conventional and RAS-based hydroponic systems. Aquac Int 26:1–10. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Espinal C, Delaide B, Schmautz Z, Jijakli H (2016) Navigating

towards decoupled Aquaponic systems (DAPS): a system dynamics design approach. Water 8:7

Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.07.003

Jones BJ (2005) Hydroponics – a practical guide for the soilless grower, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton

Jung IS, Lovitt RW (2011) Leaching techniques to remove metals and potentially hazardous nutrientes from trout farm sludge. Water Res 45:5977–5986. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.062

Karimanzira D, Keesman KJ, Kloas W, Baganz D, Rauschenbach T (2016) Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system. Aquac Eng 75:29–45. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.10.004

Karimanzira D, Keesman K, Kloas W, Baganz D, Rauschenbach T (2017) Efficient and economical way of operating a recirculation aquaculture system in an aquaponics farm. Aquac Econ Manag 21:470–486. https://doi.org/10.1080/13657305.2016.1259368

Kloas W, Groß R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquac Envi- ron Interact 7:179–192. https://doi.org/10.3354/aei00146

Körner O, Andreassen AU, Aaslyng JM (2006) Simulating dynamic control of supplementary lighting. Acta Hortic 711:151–156. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.711.17

Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. Acta Hortic 1170:309–316. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.37

Körner O, Pedersen JS, Jaegerholm J (2018) Simulating lettuce production in multi layer moving gutter systems. Acta Hortic 1227:283–290

Lupatsch I, Kissil GW (1998) Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (Sparus aurata) culture using a nutritional approach. Aquat Living Resour 11:265–268. https://doi.org/10.1016/ S0990-7440(98)80010-7

Mirzoyan N, Gross A (2013) Use of UASB reactors for brackish aquaculture sludge digestión under different conditions. Water Res 47:2843–2850. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.050

Monsees H, Keitel J, Paul M, Kloas W, Wuertz S (2017a) Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. Aquac Environ

Interact 9:9–18. https://doi.org/10.3354/aei00205
Monsees H, Kloas W, Wuertz S, Cao X, Zhang L, Liu X (2017b) Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12:e0183056. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056
Morris KA (2001) Introduction to feedback control. Harcourt/Academic Press, San Diego
Neto RM, Ostrensky A (2013) Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions. Aquac Res 46:1309–1322. https:// doi.org/10.1111/are.12280
Nyquist H (1932) Regeneration theory. Bell Syst Tech J 11:126–147. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x
Ogata K (2010) Modern control engineering, 5th edn. Pearson, DelhiRakocy JE, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2004) Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. Acta Hortic 648:63–69
Resh HM (2002) Hydroponic tomatoes. CRC Press, Boca Raton
Resh HM (2012) Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. CRC Press, Boca Raton
Resh HM (2013) Hydroponic food production: a definite guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower, 7th edn. CRC Press, Hoboken
Reyes Lastiri D, Slinkert T, Cappon HJ, Baganz D, Staaks G, Keesman KJ (2016) Model of an aquaponic system for minimised water, energy and nitrogen requirements. Water Sci Technol. wst2016127 74:30–37. https://doi.org/10.2166/wst.2016.127
Ross LG (2000) Environmental physiology and energetics. In: McAndrew BJ (ed) Tilapias: biology and exploitation. Springer, Dordrecht, pp 89–128
Schrader KK, Davidson JW, Summerfelt ST (2013) Evaluation of the impact of nitrate-nitrogen levels in recirculating aquaculture systems on concentrations of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in water and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquac Eng 57:126–130. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.07.002
Shahzad MW, Burhan M, Ang L, Ng KC (2017) Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. Desalination 413:52–64. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009
Sonneveld C, Voogt W (2009) Nutrient management in substrate systems. In: Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht, pp 277–312. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2532-6_13
Subramani A, Jacangelo JG (2015) Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review. Water Res 75:164–187.

https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.032
Timmons MB, Ebeling JM (2013) Recirculating aquaculture, 3rd edn. Ithaca Publishing Company LLC, Ithaca
van Gorcum B, Goddek S, Keesman KJ (2019) Gaining market insights for aquaponically produced vegetables in Kenya. Aquac Int:1–7. https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-019-00379-1
Yavuzcan Yildiz H, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review. Water 9:13. https://doi.org/10.3390/w9010013
Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid. Aquaponics Water 8:589. https://doi.org/10.3390/W8120589

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 9

CICLOS DE NUTRIENTES EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Mathilde Eck, Oliver Körner, and M. Haïssam Jijakli

Capítulo 9.

CICLOS DE NUTRIENTES EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Mathilde Eck, Oliver Körner, and M. Haïssam Jijakli*

Resumen
En acuaponia, los nutrientes se originan principalmente de la alimentación de peces y de los aportes de agua en el sistema. El pez ingiere una parte sustancial del alimento y lo usa para el crecimiento y el metabolismo o lo excreta como heces solubles y sólidas, mientras que el resto del alimento no consumido se descompone en los tanques. Si bien las excreciones solubles están fácilmente disponibles para las plantas, las heces sólidas necesitan ser mineralizadas por microorganismos para que su contenido de nutrientes esté disponible para la absorción de las plantas. Por lo tanto, es más difícil controlar las concentraciones de nutrientes disponibles en acuaponia que en hidroponia. Además, muchos factores, entre otros el pH, la temperatura y la intensidad de la luz, influyen en la disponibilidad de nutrientes y la absorción de la planta. Hasta hoy, la mayoría de los estudios se han centrado en los ciclos de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, para garantizar un buen rendimiento de los cultivos, es necesario proporcionar a las plantas niveles suficientes de todos los nutrientes claves. Por lo tanto, es esencial comprender y controlar mejor los ciclos de nutrientes en acuaponia.

Palabras clave: Acuaponía; Ciclo de nutrientes; Solubilización; Procesos microbiológicos

9.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuapónicos ofrecen varias ventajas cuando se trata de producir alimentos de una manera innovadora y sostenible. Además de los efectos sinérgicos del aumento de la concentración aérea de Co_2 para los cultivos de invernadero y la disminución del consumo total de energía

M. Eck (*) M. H. Jijakli
Integrated and Urban Plant Pathology Laboratory, Université de Liège, Agro-Bio Tech, Gembloux,, Belgium
E-mail: mathilde.eck@uliege.be; mh.jijakli@uliege.be
O. Körner
Leibniz-Institute of Vegetable and Ornamental Crops (IGZ), Grossbeeren, Germany
E-mail: koerner@igzev.de

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_9

térmica cuando se cultivan peces y cultivos en el mismo espacio (Körner et al. 2017), la acuaponía tiene dos ventajas principales para el ciclo de nutrientes. Primero, la combinación de un sistema de recirculación acuícola con producción hidropónica evita la descarga de efluentes acuícolas enriquecidos en nitrógeno disuelto y fósforo en aguas subterráneas ya contaminadas (Buzby y Lin 2014; Guangzhi 2001; van Rijn 2013), y segundo, permite la fertilización de los cultivos sin suelo con lo que se puede considerar una solución orgánica (Goddek et al. 2015; Schneider et al. 2004; Yogev et al. 2016) en lugar de usar fertilizantes de origen mineral elaborados a partir del agotamiento de recursos naturales (Schmautz et al. 2016; Cap.2). Además, la acuaponía produce un crecimiento similar de las plantas en comparación con la hidroponía convencional a pesar de las concentraciones más bajas de la mayoría de los nutrientes en el agua de la acuicultura (Graber y Junge 2009; Bittsanszky et al. 2016; Delaide y col. 2016), y la producción puede ser incluso mejor que en el suelo (Rakocy et al. 2004). Se cree que el aumento de las concentraciones de Co_2 en el entorno aéreo y los cambios en los biomas de la zona radicular son las principales razones de esto. Además, se ha informado que el contenido mineral y la calidad nutricional de los tomates cultivados en acuaponía son equivalentes o superiores al contenido mineral de los cultivados convencionalmente (Schmautz et al. 2016).

A pesar de tener dos activos atractivos (es decir, el reciclaje de los efluentes de la acuicultura y el uso de fertilizantes orgánicos), el uso de los efluentes de la acuicultura aumenta el desafío de monitorear los nutrientes dentro de la solución. De hecho, es más difícil controlar la composición de una solución donde los nutrientes se originan a partir de una degradación biológica de la materia orgánica que seguir la evolución de la concentración de nutrientes en una solución hidropónica dosificada con precisión basada en compuestos minerales (Bittsanszky et al. 2016; Timmons y Ebeling 2013). Además, las necesidades nutricionales de una planta varían durante el período de crecimiento de acuerdo con las etapas fisiológicas, y es necesario satisfacer estas necesidades para maximizar los rendimientos (Bugbee 2004; Zekki et al. 1996; Cap. 4).

Para reciclar los efluentes de la acuicultura para producir biomasa vegetal, es necesario optimizar las tasas de reciclaje de fósforo y nitrógeno (Goddek et al. 2016; Graber y Junge 2009; Cap. 1). Varios factores pueden influir en esto, como las especies de peces, la densidad de peces, la temperatura del agua, el tipo de plantas y la comunidad microbiana (ibid.). Por lo tanto, es de suma importancia comprender el funcionamiento de los ciclos de nutrientes en acuaponía (Seawright et al. 1998). Este capítulo tiene como objetivo explicar los orígenes de los nutrientes en un sistema acuapónico,

describir los ciclos de nutrientes y analizar las causas de las pérdidas de nutrientes.

9.2 ORIGEN DE NUTRIENTES

Las principales fuentes de nutrientes en un sistema de acuaponía son la alimentación de peces y el agua añadida (que contiene Mg, Ca, S) (ver Sección 9.3.2.) En el sistema (Delaide et al. 2017; Schmautz et al. 2016) como se detalla en el cap. 13. Con respecto al alimento para peces, hay dos tipos principales: alimento a base de harina de pescado y alimento a base de plantas. La harina de pescado es el tipo clásico de alimento utilizado en la acuicultura, donde los lípidos y las proteínas dependen de la harina y el aceite de pescado (Geay et al. 2011). Sin embargo, desde hace algún tiempo, se han planteado preocupaciones con respecto a la sostenibilidad de dicho alimento y se ha llamado la atención hacia las dietas basadas en plantas (Boyd 2015; Davidson et al. 2013; Hua y Bureau 2012; Tacon y Metian 2008). Un metaanálisis realizado por Hua y Bureau (2012) reveló que el uso de proteínas vegetales en la alimentación de peces puede influir en el crecimiento de los peces si se incorpora en altas proporciones. De hecho, las proteínas vegetales pueden tener un impacto en la digestibilidad y los niveles de factores antinutricionales del alimento. En particular, el fósforo procedente de plantas y, por lo tanto, en forma de fitatos, no beneficia, por ejemplo, al salmón, la trucha y varias otras especies de peces (Timmons y Ebeling 2013). No es sorprendente que esta observación dependa en gran medida de las especies de peces y de la calidad de los ingredientes (Hua y Bureau 2012). Sin embargo, se sabe poco del impacto de la composición variable de los alimentos para peces en los rendimientos de los cultivos (Yildiz et al. 2017).

El alimento para peces clásico está compuesto por 6–8 macro ingredientes y contiene 6–8% de nitrógeno orgánico, 1.2% de fósforo orgánico y 40–45% de carbono orgánico (Timmons y Ebeling 2013) con alrededor del 25% de proteína para peces herbívoros u omnívoros y alrededor de 55 % de proteína para peces carnívoros (Boyd 2015). Los lípidos también pueden ser basados en peces o plantas (Boyd 2015).

Una vez que el alimento para peces se agrega al sistema, los peces comen una parte sustancial del mismo y lo usan para el crecimiento y el metabolismo o lo excretan como heces solubles y sólidas, mientras que el resto del alimento dado se descompone en los tanques (Goddek et al. 2015; Schneider et al.2004) (Fig. 9.1).

En este caso, los restos de alimento y los productos metabólicos se disuel-

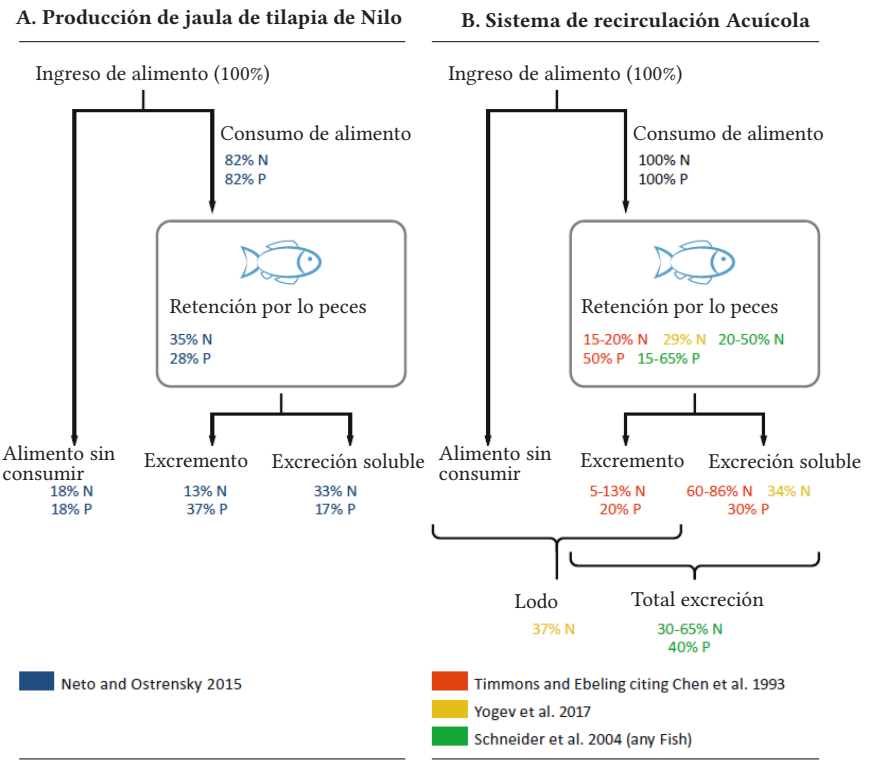


Fig. 9.1 Flujo ambiental de nitrógeno y fósforo en % para (a) producción de jaula de tilapia del Nilo (después de Neto y Ostrensky 2015) y (b) producción de RAS (de una variedad de fuentes).

ven parcialmente en el agua acuapónica, lo que permite a las plantas absorber nutrientes directamente de la solución acuapónica (Schmautz et al. 2016). En la mayoría de los sistemas de cultivo (cap. 7 y 8), se pueden agregar nutrientes para complementar la solución de acuaponía y asegurar una mejor correspondencia con las necesidades de las plantas (Goddek et al. 2015). De hecho, incluso cuando el sistema está acoplado, es posible agregar hierro o potasio (que a menudo faltan) sin dañar el pescado (Schmautz et al. 2016).

9.2.1 Restos de alimento para peces y heces de pescado

Idealmente, todo el alimento dado debe ser consumido por los peces (Fig. 9.1). Sin embargo, una pequeña parte (menos del 5% (Yogev et al. 2016)) a menudo se descompone en el sistema y contribuye a la carga de nutrientes del agua (Losordo et al. 1998; Roosta y Hamidpour 2013; Schmautz et al. 2016), consumiendo así oxígeno disuelto y liberando dióxido de carbono y amonío (Losordo et al. 1998), entre otras cosas. La composición de los

restos de alimento para peces depende de la composición del alimento.

Lógicamente, la composición de las heces de pescado depende de la dieta de los peces, lo que también tiene un impacto en la calidad del agua (Buzby y Lin 2014; Goddek et al. 2015). Sin embargo, la retención de nutrientes en la biomasa de peces depende en gran medida de las especies de peces, los niveles de alimentación, la composición del alimento, el tamaño de los peces y la temperatura del sistema (Schneider et al.2004). A temperaturas más altas, por ejemplo, el metabolismo de los peces se acelera y, por lo tanto, produce más nutrientes contenidos en la fracción sólida de las heces (Turcios y Papenbrock 2014). La proporción de nutrientes excretados también depende de la calidad y digestibilidad de la dieta (Buzby y Lin 2014). La digestibilidad del alimento para peces, el tamaño de las heces y la relación de sedimentación deben considerarse cuidadosamente para garantizar un buen equilibrio en el sistema y maximizar los rendimientos de los cultivos (Yildiz et al. 2017). De hecho, si bien es una prioridad que el alimento para peces se elija cuidadosamente para satisfacer las necesidades de los peces, los componentes del alimento también se pueden seleccionar para satisfacer los requisitos de la planta cuando no hay diferencia para el pescado (Goddek et al. 2015; Licamele 2009; Seawright et al. 1998).

9.3 PROCESOS MICROBIOLÓGICOS

9.3.1 Solubilización

La solubilización consiste en la descomposición de las moléculas orgánicas complejas que componen los desechos de pescado y las sobras de alimentación en nutrientes en forma de minerales iónicos que las plantas pueden absorber (Goddek et al. 2015; Somerville et al. 2014). En la acuicultura (Sugita et al. 2005; Turcios y Papenbrock 2014) y acuaponia, la solubilización se lleva a cabo principalmente por bacterias heterotróficas (van Rijn 2013; Cap. 6) que aún no se han identificado por completo (Goddek et al. 2015). Algunos estudios han comenzado a descifrar la complejidad de estas comunidades de bacterias (Schmautz et al. 2017).

En la acuicultura actual, las bacterias más comúnmente observadas son *Rhizobium sp., Flavobacterium sp., Sphingobacterium sp., Comamonas sp., Acinetobacter sp., Aeromonas sp. y Pseudomonas sp.* (Munguia-Fragozo y col. 2015; Sugita y col. 2005). Un ejemplo del papel principal de las bacterias en acuaponía podría ser la transformación de fitatos insolubles en fósforo (P) disponible para la absorción de las plantas a través de la producción de fitasas que están particularmente presentes en las proteobacterias-γ (Jorquera et al.2008). (Se necesita más investigación en esta área). Otros

nutrientes además del P también pueden quedar atrapados como sólidos y ser evacuados del sistema con el lodo. Por lo tanto, se están realizando esfuerzos para remineralizar este lodo con reactores UASB-EGSB para reinyectar nutrientes en el sistema acuapónico (Delaide 2017; Goddek et al.2016; cap.10). Además, no se liberan diferentes minerales a la misma velocidad, dependiendo de la composición del alimento (Letelier-Gordo et al. 2015), lo que lleva a un monitoreo más complicado de su concentración en la solución acuapónica (Seawright et al. 1998).

9.3.2 Nitrificación

La fuente principal de nitrógeno en un sistema acuapónico es el alimento para peces y las proteínas que contiene (Goddek et al. 2015; Ru et al. 2017; Wongkiew et al. 2017; Yildiz et al. 2017) Idealmente, el pescado debe comer el 100% de este alimento. Sin embargo, se ha observado que los peces solo usan alrededor del 30% del nitrógeno contenido en el alimento dado (Rafi y Saad 2005). El alimento ingerido se usa en parte para la asimilación y el metabolismo (Wongkiew et al. 2017), mientras que el resto se excreta a través de las branquias o como orina y heces (Ru et al. 2017). El nitrógeno que se excreta a través de las branquias está principalmente en forma de amoníaco, NH_3 (Wongkiew et al.2017; Yildiz et al. 2017), mientras que la orina y las heces están compuestas de nitrógeno orgánico (Wongkiew et al. 2017) que se transforma en amoníaco por proteasas y desaminasas (Sugita et al. 2005). En general, los peces excretan nitrógeno en forma de TAN, es decir, NH_3 y NH_4 +. El equilibrio entre NH_3 y NH_4 + depende principalmente del pH y la temperatura. El amoníaco es el principal desecho producido por el catabolismo de las proteínas de alimentación de los peces (Yildiz et al. 2017).

La nitrificación es un proceso de dos pasos durante el cual el amoniaco NH_3 o el amonio NH_4 + excretado por el pez se transforma primero en nitrito NO_2 y luego en nitrato NO_3 por bacterias autótrofas quimiosintéticas aerobias específicas. Se requiere una alta disponibilidad de oxígeno disuelto ya que la nitrilación consume oxígeno (Carsiotis y Khanna 1989; Madigan y Martinko 2007; Shoda 2014). El primer paso de esta transformación es llevado a cabo por bacterias oxidantes de amoníaco (AOB) como Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira, Nitrosolobus y Nitrosovibrio. El segundo paso lo llevan a cabo las bacterias oxidantes de nitrito (NOB) como Nitrobacter, Nitrococcus, Nitrospira y Nitrospina (Rurangwa y Verdegem 2013; Timmons and Ebeling 2013; Wongkiew et al.2017). Actualmente se deduce que Nitrospira es un nitrificador completo, es decir, que participa en la producción de nitritos y nitratos (Daims et al. 2015). La misma bacteria se puede encontrar tanto en la acuicultura como en los

sistemas acuaponicos (Wongkiew et al.2017). Estas bacterias se encuentran principalmente en biopelículas fijas a los medios que componen el biofiltro, pero también se pueden observar en los otros compartimentos del sistema (Timmons y Ebeling 2013). La nitrificación es de importancia primordial en acuaponía ya que el amoníaco y el nitrito son bastante tóxicos para los peces: 0.02–0.07 mg / L de amoníaco-nitrógeno son suficientes para observar daños en peces de agua tibia, y el nitrito – nitrógeno debe mantenerse por debajo de 1 mg / L (Losordo et al. 1998; Timmons y Ebeling 2013). El amoníaco afecta el sistema nervioso central de los peces (Randall y Tsui 2002; Timmons y Ebeling 2013), mientras que el nitrito induce problemas con la fijación de oxígeno (Losordo et al. 1998). Sin embargo, el pez tolera el nitrato - nitrógeno hasta 150-300 mg / L (Goddek et al. 2015; Graber y Junge 2009; Yildiz et al. 2017).

La nitrificación se lleva a cabo principalmente en biofiltros (Losordo et al. 1998; Timmons y Ebeling 2013). Por lo tanto, cuando se inicia un sistema, se recomienda ejecutar el sistema sin peces para permitir que la población de bacterias nitrificantes que crece lentamente se establezca (Timmons y Ebeling 2013; Wongkiew et al. 2017). También es necesario evitar, en la medida de lo posible, la presencia de materia orgánica en los biofiltros para evitar el crecimiento de bacterias heterotróficas altamente competitivas (Timmons y Ebeling 2013). Alternativamente, se pueden agregar mezclas comerciales de bacterias nitrificantes al sistema, antes del almacenamiento, para acelerar el proceso de colonización (Kuhn et al. 2010). Sin embargo, también existen pequeños sistemas de acuaponia sin biofiltro. En estos sistemas, las bacterias nitrificantes forman biopelículas de las superficies disponibles (por ejemplo, paredes del compartimento hidropónico, medios inertes cuando se usa la técnica de lecho de medios) (Somerville et al. 2014).

9.4 BALANCE DE MASA: ¿QUÉ SUCEDE CON LOS NUTRIENTES UNA VEZ QUE INGRESAN AL SISTEMA ACUAPÓNICO?

9.4.1 Contexto

El funcionamiento de los sistemas de acuaponía se basa en un equilibrio dinámico de los ciclos de nutrientes (Somerville et al. 2014). Por lo tanto, es necesario comprender estos ciclos para optimizar la gestión de los sistemas. Las plantas que crecen hidropónicamente tienen requisitos específicos, que deben cumplirse durante sus diversas etapas de crecimiento (Resh 2013). Por lo tanto, las concentraciones de nutrientes en los diferentes compartimentos del sistema deben ser monitoreadas de cerca, y los nutrientes deben complementarse para prevenir deficiencias (Resh 2013; Seawright et al. 1998) en el agua del sistema o mediante aplicación foliar

(Roosta y Hamidpour 2011).

9.4.1.1 Factores que influyen en los ciclos de nutrientes

La intensidad de la luz, la temperatura de la zona radicular, la temperatura del aire, la disponibilidad de nutrientes, la etapa de crecimiento y la tasa de crecimiento influyen en la absorción de nutrientes de una planta (Buzby y Lin 2014). Los experimentos realizados por Schmautz et al. (2016) y Lennard y Leonard (2006) mostraron que el método hidropónico también podría desempeñar un papel en la capacidad de absorción de nutrientes de una planta y, por lo tanto, es necesario hacer coincidir el sistema de cultivo con el tipo de vegetales que se cultivan. NFT y DWC (cultivo en aguas profundas - balsa) son, por lo tanto, adecuados para verduras de hoja verde, mientras que el riego por goteo en losas de lana de roca es más adecuado para vegetales frutales (Resh 2013).

De acuerdo con Delaide et al. (2016), en algunos casos, suplementar una solución de acuaponia con nutrientes minerales para alcanzar las mismas concentraciones de nutrientes que en hidroponía podría conducir a rendimientos más altos que los logrados en hidroponía. El primer paso para avanzar hacia un sistema equilibrado es el diseño correcto y el tamaño relativo de los compartimentos (Buzby y Lin 2014). Si el compartimento hidropónico es demasiado pequeño en comparación con los tanques de peces, los nutrientes se acumularán en el agua y podrían alcanzar niveles tóxicos. La relación de velocidad de alimentación (es decir, la cantidad de alimento para peces en el sistema basada en la superficie de crecimiento de la planta y el tipo de planta) se usa a menudo para el primer dimensionamiento del sistema (Rakocy et al. 2006; Somerville et al. 2014). Sin embargo, según Seawright et al. (1998), no es posible alcanzar una relación planta/pescado que permita una combinación óptima de las necesidades de las plantas si solo se usa el alimento para peces como entrada. Para asegurarse de que el sistema esté bien equilibrado y funcione correctamente, los métodos de monitoreo generalmente se basan en el ciclo del nitrógeno (Cerozi y Fitzsimmons 2017; Somerville et al. 2014), pero para garantizar el funcionamiento óptimo del sistema, es necesario monitorear más estrechamente el equilibrio de los otros macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) y micronutrientes (Fe, Zn, B, Mn, Mo, Cu) (Resh 2013; Somerville et al.2014; Sonneveld y Voogt 2009) también. Estudios recientes (Delaide et al. (2017), Schmautz et al. (2015, 2016)) han comenzado a abordar este tema. Schmautz y col. (2015, 2016) compararon el impacto de tres diseños hidropónicos diferentes (es decir, técnica de película de nutrientes (NFT), balsa flotante y riego por goteo) en la absorción de nutrientes de los tomates acuaponicos. El riego por goteo fue el sistema que produjo

rendimientos ligeramente mejores con tomates. El contenido mineral de las frutas (P, K, Ca, Mg) fue equivalente a los valores convencionales a pesar de que los contenidos de hierro y zinc fueron más altos. Sin embargo, las hojas tenían niveles más bajos de P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu y Zn que en la agricultura convencional. Delaide y col. (2016) siguieron los ciclos de macro y micronutrientes en un sistema acuaponico acoplado. Observaron que su solución acuapónica carecía de K, P, Fe, Cu, Zn, Mn y Mo, mientras que N, Ca, B y Na se acumulaban rápidamente. Graber y Junge (2009) señalaron que su solución acuaponica contenía tres veces menos nitrógeno y diez veces menos fósforo que una solución hidropónica. En cuanto al potasio (K), fue 45 veces menor en comparación con la hidroponía. Sin embargo, obtuvieron rendimientos como rendimientos similares a pesar de que la calidad era peor debido a la falta de potasio (K).

9.4.1.1 factores que influyen en los ciclos de nutrientes

La intensidad de la luz, la temperatura de la zona radicular, la temperatura del aire, la disponibilidad de nutrientes, la etapa de crecimiento y la tasa de crecimiento influyen en la absorción de nutrientes de una planta (Buzby y Lin 2014). Los experimentos realizados por Schmautz et al. (2016) y Lennard y Leonard (2006) mostraron que el método hidropónico también podría desempeñar un papel en la capacidad de absorción de nutrientes de una planta y, por lo tanto, es necesario hacer coincidir el sistema de cultivo con el tipo de vegetales que se cultivan. NFT y DWC (cultivo en aguas profundas - balsa) son, por lo tanto, adecuados para verduras de hoja verde, mientras que el riego por goteo en losas de lana de roca es más adecuado para vegetales frutales (Resh 2013).

9.4.2 Ciclos de macronutreintes.

Carbón (C)

El carbono se proporciona a los peces a través de la alimentación (Timmons y Ebeling 2013) y a las plantas a través de la fijación de CO2. Los peces pueden usar el 22% del carbono contenido en el alimento para peces para aumentar la biomasa y el metabolismo. El resto del carbono ingerido se expira en forma de CO_2 (52%) o se excreta en forma disuelta (0,7–3%) y sólida (25%) (Timmons y Ebeling 2013). El CO_2 expirado también puede ser utilizado por las plantas para su propia fuente de carbono (Körner et al. 2017). La parte no consumida del carbono de la alimentación se deja descomponer en el sistema. El tipo de carbohidratos que se encuentran en el alimento para peces (por ejemplo, almidón o polisacáridos sin almidón) también pueden influir en la digestibilidad del alimento y la biodegradabi-

lidad de los desechos en una acuicultura o sistema acuapónico (Meriac et al. 2014).

Nitrógeno (N)

Las plantas absorben el nitrógeno en forma de nitrato o de amonio (Sonneveld y Voogt 2009; Xu et al. 2012) dependiendo de la concentración y la fisiología de la planta (Fink y Feller 1998 citado por Wongkiew et al. 2017). Las asociaciones entre plantas y microorganismos no deben pasarse por alto ya que las plantas afectan la presencia de los microorganismos en acuaponía, y los microorganismos pueden desempeñar un papel importante en la capacidad de absorción de nitrógeno de las plantas (Wongkiew et al.2017). La absorción de nitrógeno por las plantas se ve afectada por la concentración de dióxido de carbono ambiental (Zhang et al. 2008 citado por Wongkiew et al. 2017).

Fósforo (P)

El fósforo es uno de los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y puede ser absorbido bajo su forma de ortofosfato iónico ($H2PO4$, $HPO42$, $PO43$) (Prabhu et al. 2007; Resh 2013). Poco se sabe sobre la dinámica del fósforo en acuaponía. El principal aporte de fósforo en el sistema es el alimento para peces (Cerozi y Fitzsimmons 2017; Delaide et al.2017; Schmautz et al.2015), y en los sistemas no suplementados (Capítulo 7), el fósforo tiende a ser limitante y por lo tanto puede impedir el crecimiento de las plantas (Graber y Junge 2009; Seawright et al. 1998). Según Rafi y Saad (2005), los peces pueden usar hasta el 15% del fósforo contenido en el alimento. En un sistema de cultivo de lechuga, Cerozi y Fitzsimmons (2017) notaron que la cantidad de fósforo que proporciona el alimento para peces puede ser suficiente o insuficiente dependiendo de la etapa de crecimiento. Hasta el 100% del fósforo presente en el agua de peces puede reciclarse en la biomasa de la planta, dependiendo del diseño del sistema. Graber y Junge (2009) observaron un 50% de reciclaje, mientras que Schmautz et al. (2015) informaron que el 32% del fósforo se podía encontrar en la fruta y el 28% en las hojas. La solubilidad del fósforo depende del pH, y un pH más alto fomentará la precipitación de fósforo, por lo que no estará disponible para las plantas (Yildiz et al.2017).

El fósforo puede precipitar como estruvita (fosfato de amonio y magnesio) (Le Corre et al. 2005) y/o hidroxiapatita (Cerozi y Fitzsimmons 2017; Goddek et al. 2015). Estos complejos insolubles se eliminan mediante el lodo de pescado sólido del sistema. Schneider y col. (2004) informaron que el 30-65% del fósforo contenido en el alimento para peces no está disponi-

ble para las plantas, ya que se fija en las excreciones sólidas que luego se eliminan mediante filtración mecánica. Yogev y col. (2016) estimaron que esta pérdida puede ser de hasta 85%. Una opción para evitar esta pérdida masiva de P a través de lodos sólidos es agregar un compartimento de digestión al sistema acuapónico. Durante la digestión aeróbica o anaeróbica, el P se libera en el digestato y podría reintroducirse en el agua en circulación (Goddek et al.2016).

Potasio (K)

Delaide y col. (2017) encontraron que la principal fuente de K en su sistema era la alimentación de peces. Los peces pueden usar hasta el 7% de la K contenida en el alimento para peces (Rafi y Saad 2005). Sin embargo, el potasio no es necesario para los peces, lo que conduce a una composición baja en potasio del alimento para peces e incluso a niveles más bajos de potasio disponibles para las plantas (Graber y Junge 2009; Seawright et al. 1998; Suhl et al. 2016). Para suministrar potasio, a menudo se usa un tampón de pH KOH ya que el pH a menudo disminuye en acuaponía debido a la nitrificación (Graber y Junge 2009). En un sistema acuapónico plantado con tomates, el potasio se acumula principalmente en las frutas (Schmautz et al.2016).

Magnesio (Mg), Calcio (Ca) y Azufre (S)

La fuente principal de Mg, Ca y S es el agua del grifo que facilita la absorción por parte de las plantas ya que los nutrientes ya están disponibles (Delaide et al.2017). Sin embargo, el calcio está presente en niveles insuficientes en acuaponia (Schmautz et al. 2015; Seawright et al. 1998) y se agrega bajo la forma de hidróxido de calcio Ca (OH) 2 (Timmons y Ebeling 2013). Según Rafi y Saad (2005), los peces pueden usar en promedio el 26.8% del calcio y el 20,3% del magnesio presente en el alimento. El azufre a menudo se encuentra en niveles bajos en los sistemas acuaponicos (Graber y Junge 2009; Seawright et al. 1998).

9.4.3 Ciclos de micronutrientes

El hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el zinc (Zn) se derivan principalmente de la alimentación de los peces, mientras que el boro (B) y el cobre (Cu) se derivan del agua del grifo (Delaide et al.2017). En acuaponia, los micronutrientes clave a menudo están presentes, pero a niveles demasiado bajos (Delaide et al.2017), y es necesaria la suplementación de fuentes externas de nutrientes (cap.8). Las deficiencias de hierro ocurren muy a menudo en acuaponia (Schmautz et al. 2015; Seawright et al. 1998; Fitzsimmons y

Posadas; 1997 citado por Licamele 2009), principalmente debido a la falta de disponibilidad de la forma de ión férrico. Esta deficiencia puede resolverse mediante el uso de sideróforos bacterianos (es decir, compuestos orgánicos quelantes de hierro) producidos por géneros como Bacillus o Pseudomonas (Bartelme et al. 2018) o mediante la suplementación de hierro con hierro quelado químico para evitar la precipitación de hierro.

9.4.4 Perdidas de nutrientes

Reducir la pérdida de nutrientes es un desafío constante al que se enfrentan los practicantes de acuaponía. La pérdida de nutrientes ocurre de varias maneras, ej. el asentamiento del lodo (37% de las heces y 18% de los alimentos no consumidos) (Neto y Ostrensky 2015), pérdidas de agua, desnitrificación, volatilización de amoníaco, etc. (Wongkiew et al.2017). Como ejemplo, Rafi y Saad (2005) señalan que el 24% del hierro, el 86% del manganeso, el 47% del zinc, el 22% del cobre, el 16% del calcio, el 89% del magnesio, el 6% del nitrógeno, el 6% del potasio y el 18% del fósforo contenido en la alimentación de los peces estaban contenidos en el lodo. El lodo puede contener hasta el 40% de los nutrientes presentes en la entrada de alimento (Yogev et al. 2016).

La desnitrificación puede conducir a una pérdida del 25 al 60% del nitrógeno (Hu et al. 2015; Zou et al. 2016). La desnitrificación también está relacionada con condiciones anóxicas (Madigan y Martinko 2007; van Lier et al. 2008) y bajos niveles de carbono y es responsable de la transformación de nitrato en nitrito, óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N2O) y eventualmente nitrógeno gaseoso. (N2) con flujos a la atmósfera (ibid.). La desnitrificación se lleva a cabo por varias bacterias heterotróficas facultativas como Achromobacter, Aerobacter, Acinetobacter, Bacillus, Brevibacterium, Flavobacterium, Pseudomonas, Proteus y Micrococcus sp. (Gentile et al. 2007; Michaud et al. 2006; Wongkiew et al. 2017). Algunas bacterias pueden realizar tanto nitrificación como desnitrificación si los niveles de oxígeno disuelto están por debajo de 0.3 mg / L (Fitzgerald et al. 2015; Wongkiew et al. 2017). La pérdida de nitrógeno también puede ocurrir a través de la oxidación anaeróbica de amonio (ANAMMOX), es decir, la oxidación de amonio en gas dinitrógeno en presencia de nitrito (Hu et al. 2011).

Otra pérdida importante de nitrógeno que debería estar disponible para las plantas es el consumo de nitrógeno por las bacterias aeróbicas heterotróficas presentes en los sistemas acuaponicos. De hecho, el nitrógeno utilizado por estas bacterias se pierde por las bacterias nitrificantes y, por lo tanto, se impide la nitrificación (Blancheton et al. 2013). Estas bacterias están

particularmente presentes cuando la relación C / N aumenta, ya que son más competitivas y más capaces de colonizar los medios que las bacterias nitrificantes autótrofas (Blancheton et al.2013; Wongkiew et al. 2017).

9.4.5 Dinámica del sistema de equilibrio de nutrientes

La concentración de nutrientes de los dos subsistemas principales en un sistema de acuaponia, es decir, los tanques de peces (acuicultura) y la solución hidropónica, deben equilibrarse para cada una de sus necesidades. En los sistemas acuaponicos cerrados, los nutrientes se transportan de los peces a las plantas más o menos directamente a través de filtros (generalmente un filtro de tambor o un colono y luego un biofiltro) para la nitrificación. Sin embargo, las necesidades de nutrientes de los cultivos y los nutrientes suministrados del subsistema acuaponico no están en equilibrio. En los sistemas de múltiples bucles y desacoplados (Capítulo 8), es más fácil proporcionar condiciones óptimas para las secciones de peces y plantas. Mediante el modelado de los sistemas (cap. 11), se puede calcular el tamaño óptimo del área hidropónica de tanques de peces, biofiltros y otros equipos (Goddek y Körner 2019). Esto es particularmente importante con los sistemas de múltiples bucles desacoplados que comprenden varios tipos de equipos. Por ejemplo, UASB (capa de lodo anaeróbico de flujo ascendente) (Goddek et al.2018) o unidades de desalinización (Goddek y Keesman 2018) deben dimensionarse cuidadosamente como se discutió en el Capítulo. 8. El desajuste básico de los nutrientes suministrados por el medio ambiente de los peces y las necesidades de los cultivos necesita ser rectificado y equilibrado. Con el fin de concentrar los nutrientes, Goddek y Keesman (2018) han descrito una unidad de desalinización adecuada (cap.8). Sin embargo, este enfoque solo resuelve parte del problema, ya que el sistema perfectamente equilibrado es impulsado por una tasa de evaporación no dinámica que solo se puede lograr en cámaras cerradas y plantas que funcionan perfectamente. La realidad, sin embargo, es que la evapotranspiración del cultivo (ETc) en los sistemas de acuaponía basados en invernadero depende en gran medida de múltiples factores, como el clima físico y las variables biológicas. ETc se calcula por área de la superficie del suelo cubierta por el cultivo y se calcula para diferentes niveles en el dosel (z) integrando flujos netos de irradiación, resistencia de la capa límite, resistencia de estomas y el déficit de presión de vapor, en el dosel (Körner et al. 2007) usando la ecuación de Penman-Monteith. Esta ecuación, sin embargo, solo calcula el flujo de agua a través del cultivo. La absorción de nutrientes puede calcularse simplemente asumiendo que todos los nutrientes diluidos en el agua son absorbidos por el cultivo. Sin embargo, en realidad, la absorción de nutrientes es un asunto muy complicado. Diferentes nutrientes tienen diferentes estados, cambiando con paráme-

tros como el pH. Mientras tanto, la disponibilidad de nutrientes para las plantas depende en gran medida del pH y las relaciones de nutrientes entre sí (por ejemplo, disponibilidad de K / Ca). Además, el microbioma en la zona de la raíz juega un papel importante (Orozco-Mosque et al.2018) que aún no se implementa en los modelos, aunque algunos modelos diferencian entre las rutas del floema y la xilema. Por lo tanto, la gran cantidad de nutrientes no está modelada en detalle para el equilibrio de nutrientes y el dimensionamiento de los sistemas. La forma más fácil de estimar la absorción de nutrientes es la suposición de que los nutrientes se absorben a medida que se disuelven en el agua de riego y se aplican al enfoque de cálculo de ETc explicado anteriormente, y suponiendo que no existan resistencias químicas, biológicas o físicas específicas del elemento. Consecuentemente, para mantener el equilibrio, todos los nutrientes absorbidos por el cultivo tal como están contenidos en la solución nutritiva deben agregarse nuevamente al sistema hidropónico.

9.5 CONCLUSIONES

9.5.1 inconvenientes actuales del ciclo de nutrientes en acuaponía

En hidroponía, la solución de nutrientes se determina con precisión y la entrada de nutrientes en el sistema se entiende y controla bien. Esto hace que sea relativamente fácil adaptar la solución de nutrientes para cada especie de planta y para cada etapa de crecimiento. En acuaponía, de acuerdo con la definición (Palm et al. 2018), los nutrientes deben originarse al menos al 50% a partir de alimentos no consumidos, heces sólidas y excreciones solubles de pescado, lo que hace que el monitoreo de las concentraciones de nutrientes disponibles para la absorción de las plantas sea más difícil. Un segundo inconveniente es la pérdida de nutrientes a través de varias vías, como la eliminación de lodos, la renovación del agua o la desnitrificación. La eliminación del lodo induce una pérdida de nutrientes ya que varios nutrientes clave, como el fósforo, a menudo precipitan y quedan atrapados en el lodo sólido evacuado. La renovación del agua, que debe realizarse incluso en pequeñas proporciones, también se suma a la pérdida de nutrientes del circuito acuapónico. Finalmente, la desnitrificación ocurre debido a la presencia de bacterias desnitrificantes y condiciones favorables a sus metabolismos.

9.5.2 ¿Cómo mejorar el ciclo de nutrientes?

Para concluir, el ciclo de nutrientes aún necesita ser mejorado para optimizar el crecimiento de las plantas en acuaponía. Actualmente se exploran varias opciones en Chap. 8. Para evitar perder los nutrientes

capturados en el lodo, se han desarrollado unidades de remineralización de lodo (cap. 10). El objetivo de estas unidades es extraer los nutrientes capturados en forma sólida en el lodo y reinyectarlos en el sistema bajo una forma que las plantas puedan absorber (Delaide 2017). Una técnica adicional para reducir la pérdida de nutrientes sería fomentar la absorción de las plantas a través de la concentración de la solución acuapónica (es decir, la eliminación de una fracción del agua para mantener la misma cantidad de nutrientes, pero en un menor volumen de agua). Dicha concentración podría lograrse mediante la adición de una unidad de desalinización como parte del sistema acuapónico (Goddek y Körner 2019; Goddek y Keesman 2018). Finalmente, el uso de sistemas desacoplados / de múltiples bucles permite condiciones óptimas de vida y crecimiento para todos los peces, plantas y microorganismos. Si bien se han realizado algunas investigaciones en este campo, se deben realizar más investigaciones para comprender mejor el ciclo de nutrientes en acuaponía. De hecho, más información sobre los ciclos exactos de cada macronutriente (qué forma, cómo puede ser transformado o no por microorganismos, cómo es absorbido por las plantas en acuaponía) o la influencia de la planta y las especies de peces y los parámetros del agua sobre los ciclos de nutrientes podrían ayudar mucho a la comprensión de los sistemas Acuapónicos.

REFERENCIAS

Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet OJ, Newton RJ (2018) Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. Front Microbiol 9(8). https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008

Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge R, Villarroel M, Kotzen B, Komives T (2016) Nutrient supply of plants in aquaponic systems. Ecocycles 2(1720). https://doi.org/10.19040/ ecocycles.v2i2.57

Blancheton JP, Attramadal KJK, Michaud L, d'Orbcastel ER, Vadstein O (2013) Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquac Eng 53:30–39Boyd CE (2015) Overview of aquaculture feeds: global impacts of ingredient use. Feed Feed Pract Aquac 3–25. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100506-4.00001-5

Bugbee B. (2004) Nutrient management in recirculating hydroponic culture. Acta Hortic 648:99–112. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.12

Buzby KM, Lin LS (2014) Scaling aquaponic systems: balancing plant uptake with fish output. Aquac Eng 63:39–44. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002

Carsiotis M, Khanna S (1989) Genetic engineering of microbial nitrification. United States Envi- ronmental Protection Agency, Risk

Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati
Cerozi BS, Fitzsimmons K (2017) Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. Agric Syst 153:94–100. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020
Daims H, Lebedeva EV, Pjevac P, Han P, Herbold C, Albertsen M, Jehmlich N, Palatinszky M, Vierheilig J, Bulaev A, Kirkegaard RH, Von Bergen M, Rattei T, Bendinger B, Nielsen H, Wagner M (2015) Complete nitrification by Nitrospira bacteria. Nature 528:504. https://doi.org/10.1038/nature16461
Davidson J, Good C, Barrows FT, Welsh C, Kenney PB, Summerfelt ST (2013) Comparing the effects of feeding a grain- or a fish meal-based diet on water quality, waste production, and rainbow trout Oncorhynchus mykiss performance within low exchange water recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 52:45–57. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.08.001
Delaide B(2017) A study on the mineral elements available in aquaponics, their impact on lettuce productivity and the potential improvement of their availability. PhD thesis. Gembloux Agro- Bio Tech, University of Liege
Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Haissam Jijakli M, Lalman J, Junge R (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water 8. https://doi.org/10.3390/w8100467
Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. Aquac Eng 78:130–139. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002
Fitzgerald CM, Camejo P, Oshlag JZ, Noguera DR (2015) Ammonia-oxidizing microbial commu- nities in reactors with efficient nitrification at low-dissolved oxygen. Water Res 70:38–51. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2014.11.041
Geay F, Ferraresso S, Zambonino-Infante JL, Bargelloni L, Quentel C, Vandeputte M, Kaushik S, Cahu CL, Mazurais D (2011) Effects of the total replacement of fish-based diet with plant-based diet on the hepatic transcriptome of two European sea bass (Dicentrarchus labrax) half-sibfamilies showing different growth rates with the plant-based diet. BMC Genomics 12:522. https://doi.org/10.1186/1471-2164-12-522
Gentile ME, Lynn Nyman J, Criddle CS (2007) Correlation of patterns of denitrification instability in replicated bioreactor communities with shifts in the relative abundance and the denitrification patterns of specific populations. ISME J 1:714–728. https://doi.org/10.1038/ismej.2007.87
Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for

designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85. https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.11.024
Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015)
Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Schmautz Z, Scott B, Delaide B, Keesman K, Wuertz S, Junge R (2016) The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. Agronomy 6:37. https://doi.org/10.3390/agronomy6020037
Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP et al (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048
Guangzhi G (2001) Mass balance and water quality in aquaculture tanks. The United Nations University, Fisheries Training Programme, Reyjavik
Hu B, Shen L, Xu X, Zheng P (2011) Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. Biochem Soc Trans 39:1811–1816. https://doi.org/10.1042/BST20110711
Hu Z, Lee JW, Chandran K, Kim S, Brotto AC, Khanal SK (2015) Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. Bioresources 188:92–98. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.013
Hua K, Bureau DP (2012) Exploring the possibility of quantifying the effects of plant protein ingredients in fish feeds using meta-analysis and nutritional model simulation-based approaches. Aquaculture 356–357:284–301. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2012.05.003
Jorquera M, Martínez O, Maruyama F, Marschner P, de la Luz Mora M (2008) Current and future biotechnological applications of bacterial Phytases and phytase-producing Bacteria. Microbes Environ 23:182–191. https://doi.org/10.1264/jsme2.23.182
Körner O, Aaslyng JM, Andreassen AU, Holst N (2007) Modelling microclimate for dynamic greenhouse climate control. Hortscience 42:272–279
Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. Acta Hortic 1170:309–316
Kuhn DD, Drahos DD, Marsh L, Flick GJ (2010) Evaluation of nitrifying bacteria product to improve nitrification efficacy in recirculating

aquaculture systems. Aquac Eng 43:78–82. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2010.07.001

Le Corre KS, Valsami-Jones E, Hobbs P, Parsons SA (2005) Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity. J Cryst Growth 283:514–522. https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2005.06.012

Lennard WA, Leonard BV (2006) A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an Aquaponic test system. Aquac Int 14:539–550. https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2

Letelier-Gordo CO, Dalsgaard J, Suhr KI, Ekmann KS, Pedersen PB (2015) Reducing the dietary protein:energy (P:E) ratio changes solubilization and fermentation of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) faeces. Aquac Eng 66:22–29

Licamele J (2009) Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. PhD thesis. Department of Agriculture and biosystems engineering, University of Arizona

Losordo TM, Masser MP, Rakocy J (1998) Recirculating aquaculture tank production systems: an overview of critical considerations. SRAC No. 451, pp 18–31

Madigan MT, Martinko JM (2007) Biologie des micro-organismes, 11th edn. Pearson Education France, Paris

Meriac A, Eding EH, Schrama J, Kamstra A, Verreth JAJ (2014) Dietary carbohydrate composition can change waste production and biofilter load in recirculating aquaculture systems. Aquacul- ture 420–421:254–261. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.11.018

Michaud L, Blancheton JP, Bruni V, Piedrahita R (2006) Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. Aquac Eng 34:224–233. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.005

Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, Ocampo-Velazquez RV, Garcia-Trejo JF, Guevara-Gonzalez RG (2015) Perspective for aquaponic systems: "omic" technologies for microbial community analysis. Biomed Res Int 2015:1. https://doi.org/10.1155/2015/480386

Neto MR, Ostrensky A (2015) Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia Oreochromis niloticus (L.) reared in cages in tropical climate conditions. Aquac Res 46:1309–1322. https:// doi.org/10.1111/are.12280

Orozco-Mosque MC, Rocha-Granados MC, Glick BR, Santoyo G (2018) Microbiome engineering to improve biocontrol and plant growth-promoting mechanism. Microbiol Res. In Pres

Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam Jijakli M, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. Aquac Int

26:813–842
Prabhu AS, Fageria NK, Berni RF, Rodrigues FA (2007) Phosphorus and plant disease. In: Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (eds) Mineral nutrition and plant disease. The American Phyto- pathological Society, St. Paul, pp 45–55
Rafiee G, Saad CR (2005) Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. Aquaculture 244:109–118. https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2004.10.029
Rakocy JE, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2004) Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. Acta Hortic 648:63–69. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8
Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publ South Reg Aquac Cent 16. https:// doi.org/454
Randall D, Tsui TK (2002) Ammonia toxicity in fish. Mar Pollut Bull 45:17–23. https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8
Resh HM (2013) Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower, 7th edn. CRC Press, Boca Raton
Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. Sci Hortic 129:396–402. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2011.04.006
Roosta HR, Hamidpour M (2013) Mineral nutrient content of tomato plants in Aquaponic and hydroponic systems: effect of foliar application of some macro- and micro-nutrients. J Plant Nutr 36:2070–2083. https://doi.org/10.1080/01904167.2013.821707
Ru D, Liu J, Hu Z, Zou Y, Jiang L, Cheng X, Lv Z (2017) Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. Environ Sci Pollut Res 24:16328–16335. https:// doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1
Rurangwa E, Verdegem MCJ (2013) Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. Rev Aquac 7:117–130. https://doi.org/10.1111/raq.12057
Schmautz Z, Graber A, Mathis A, Griessler Bulc T, Junge R (2015) Tomato production in aquaponic system: mass balance and nutrient recycling (abstract)
Schmautz Z, Loeu F, Liebisch F, Graber A, Mathis A, Bulc TG, Junge R (2016) Tomato productivity and quality in aquaponics: comparison of three hydroponic methods. Water 8:1–22. https://doi.org/10.3390/w8110533
Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits THM

(2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199:613. https://doi.org/10.1007/s00203-016-1334-1

Schneider O, Sereti V, Eding EH, Verreth JAJ (2004) Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. Aquac Eng 32:379–401. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001

Seawright DE, Stickney RR, Walker RB (1998) Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems. Aquaculture 160:215–237

Shoda M (2014) Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by Alcaligenes faecalis. J Biosci Bioeng 117:737–741. https://doi.org/10.5772/68052

Somerville C, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome

Sonneveld C, Voogt W (2009) Plant nutrition of greenhouse crops. Springer, Dordrecht/ Heidelberg/London/New York

Sugita H, Nakamura H, Shimada T (2005) Microbial communities associated with filter materials in recirculating aquaculture systems of freshwater fish. Aquaculture 243:403. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.028

Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Scheibe G, Schmidt U (2016) Advanced aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydro- ponics. Agric Water Manag 178:335–344. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013

Tacon AGJ, Metian M (2008) Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. Aquaculture 285:146–158. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015

Timmons MB, Ebeling JM (2013) Recirculating aquaculture. Ithaca Publishing, New York

Turcios AE, Papenbrock J (2014) Sustainable treatment of aquaculture effluents—what can we learn from the past for the future? Sustainability 6:836–856. https://doi.org/10.3390/su6020836

van Lier JB, Mahmoud N, Zeeman G (2008) In: Henze M, van Loosdrecht MCM, Ekama GA, Brdjanovic D (eds) Anaerobic wastewater treatment, in: biological wastewater treatment: principles, modelling and design. IWA Publishing, London. ISBN: 9781843391883

van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 53:49–56. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.010

Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, Lee JW, Khanal SK (2017) Nitrogen transformations in aquaponic systems: a review. Aquac Eng 76:9–19. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004

Xu G, Fan X, Miller AJ (2012) Plant nitrogen assimilation and use efficiency. Annu Rev Plant Biol 63:153–182. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532

Yildiz HY, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in Aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and Faeces—a review. Water 9. https://doi.org/10.3390/w9010013

Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. Water 8. https://doi.org/10.3390/w8120589

Zekki H, Gauthier L, Gosselin A (1996) Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J Am Soc Hortic Sci 121:1082–1088

Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Guimbaud C, Fang Y (2016) Effects of pH on nitrogen trans- formations in media-based aquaponics. Bioresour Technol 210:81–87. https://doi.org/10.1016/ J.BIORTECH.2015.12.079

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 10

TRATAMIENTOS AERÓBICOS Y ANAERÓBICOS PARA LA REDUCCIÓN DE LODOS Y LA MINERALIZACIÓN DE ACUAPONÍA

Boris Delaide, Hendrik Monsees, Amit Gross, and Simon Goddek

Capítulo 10

TRATAMIENTOS AERÓBICOS Y ANAERÓBICOS PARA LA REDUCCIÓN DE LODOS Y LA MINERALIZACIÓN DE ACUAPONÍA

Boris Delaide, Hendrik Monsees, Amit Gross, and Simon Goddek*

Resumen

Los sistemas de recirculación de la acuicultura, como parte de las unidades de acuaponia, son efectivos en la producción de animales acuáticos con un consumo mínimo de agua a través de etapas de tratamiento efectivas. Sin embargo, el lodo concentrado producido después de la etapa de filtración sólida, que comprende materia orgánica y nutrientes valiosos, se descarta con mayor frecuencia. Uno de los últimos desarrollos en tecnología acuapónica tiene como objetivo reducir este impacto ambiental negativo potencial y aumentar el reciclaje de nutrientes mediante el tratamiento del lodo en el sitio. Para este propósito, los tratamientos microbianos aeróbicos y anaeróbicos, tratados individualmente o en un enfoque combinado, brindan oportunidades muy prometedoras para reducir simultáneamente los desechos orgánicos, así como para recuperar valiosos nutrientes como el fósforo. Los tratamientos con lodos anaeróbicos también ofrecen la posibilidad de producción de energía, ya que un subproducto de este proceso es el biogás, es decir, principalmente metano. Al aplicar estos pasos de tratamiento adicionales en unidades de acuaponía, se mejora la eficiencia del reciclaje de agua y nutrientes y se puede reducir la dependencia del fertilizante externo, mejorando así la sostenibilidad del sistema en términos de utilización de recursos. En general, esto puede allanar el camino para la mejora económica

B. Delaide (*)
Developonics asbl, Brussels, Belgium
E-mail: boris@developonics.com; borisdelaide@hotmail.com
H. Monsees
Leibniz-Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, Germany
E-mail: h.monsees@igb-berlin.de
A. Gross
Department of Environmental Hydrology and Microbiology, Zuckerberg Institute for Water Research, Blaustein Institutes for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Beersheba, Israel
E-mail: amgross@bgu.ac.il
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands
E-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_10

de los sistemas de acuaponia porque los costos de eliminación de desechos y adquisición de fertilizantes disminuyen.

Palabras clave: Reciclaje de lodos; Fósforo; Conversión de lodos microbianos; Balance de masa; Reciclaje de nutrientes.

10.1 INTRODUCCIÓN

El concepto de acuaponía está asociado con ser un sistema de producción sostenible, ya que reutiliza las aguas residuales del sistema de recirculación de la acuicultura (RAS) enriquecidas en macronutrientes (es decir, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S)) y micronutrientes (es decir, hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B) y molibdeno (Mo)) para fertilizar las plantas (Graber y Junge 2009; Licamele 2009; Nichols y Savidov 2012; Turcios y Papenbrock 2014). Una pregunta muy debatida es si este concepto puede igualar su propia ambición de ser un sistema de circuito casi cerrado, ya que se desperdician grandes cantidades de nutrientes que ingresan al sistema al descargar el lodo de peces rico en nutrientes (Endut et al. 2010; Naylor et al. 1999; Neto y Ostrensky 2013). De hecho, para mantener una buena calidad del agua en un RAS y sistemas acuaponicos, el agua debe filtrarse constantemente para la eliminación de sólidos. Las dos técnicas principales para la filtración sólida son retener las partículas en una malla (es decir, filtración de malla como filtros de tambor) y permitir que las partículas se decanten en los clarificadores. En la mayoría de las plantas convencionales, el lodo se recupera de estos dispositivos de filtración mecánica y se descarga como alcantarillado. En los mejores casos, el lodo se seca y se aplica como fertilizante en los campos terrestres (Brod et al. 2017). Notablemente, hasta el 50% (en materia seca) de la alimentación ingerida se excreta como sólidos por los peces (Chen et al. 1997), y la mayoría de los nutrientes que ingresan a los sistemas acuaponicos a través de la alimentación de peces se acumulan en estos sólidos y así en el lodo (Neto y Ostrensky 2013; Schneider et al. 2005). Por lo tanto, la filtración sólida efectiva elimina, por ejemplo, más del 80% del valioso P (Monsees et al. 2017) que de otro modo podría usarse para la producción de plantas. Por lo tanto, reciclar estos valiosos nutrientes para aplicaciones acuaponicas es de gran importancia. El desarrollo de un tratamiento de lodo apropiado capaz de mineralizar los nutrientes contenidos en el lodo para reutilizarlos en la unidad hidropónica parece ser un proceso necesario para contribuir a cerrar el ciclo de nutrientes en un mayor grado y, por lo tanto, reducir el impacto ambiental de los sistemas acuaponicos (Goddek et al.2015; Goddek y Keesman 2018; Goddek y Körner 2019).

Se ha demostrado en estudios experimentales que la solución de nutrientes acuapónicos complementados (es decir, después de la adición de nutrientes que faltan) promueve el crecimiento de las plantas en comparación con la hidroponía (Delaide et al. 2016; Ru et al. 2017; Saha et al. 2016). Por lo tanto, la mineralización de lodos también es una forma prometedora de mejorar el rendimiento del sistema de acuaponía, ya que los nutrientes recuperados se utilizan para complementar la solución de acuaponía. Además, las unidades de mineralización en el sitio también pueden aumentar la autosuficiencia de las instalaciones de acuaponía, especialmente con respecto a los recursos finitos como P, que es esencial para el crecimiento de las plantas. El P es producido por las actividades mineras, por lo que los depósitos no se distribuyen por igual en todo el mundo. Además, su precio ha aumentado hasta un 800% en la última década (McGill 2012). Por lo tanto, es probable que las unidades de mineralización aplicadas en sistemas acuapónicos también aumenten su futuro éxito económico y estabilidad.

El tratamiento de lodos en acuaponía debe abordarse de manera diferente a como se hizo en el pasado. De hecho, en el tratamiento convencional de aguas residuales, el objetivo principal es obtener un efluente descontaminado y limpio. Los rendimientos del tratamiento se expresan en términos de eliminación de contaminantes (p. Ej., Sólidos, nitrógeno (N), fósforo (P), etc.) del agua residual y cuantificando los efluentes con respecto a la calidad alcanzada (Techobanoglous et al. 2014). Usando este enfoque convencional, varios estudios han proporcionado evidencia cuantitativa de que una proporción constante de la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (TSS) se pueden eliminar al digerir las aguas residuales RAS en condiciones aerobias, anaerobias y aerobias secuenciales anaerobias. (Goddek et al. 2018; Chowdhury et al. 2010; Mirzoyan et al. 2010; Van Rijn 2013). Sin embargo, en los sistemas de acuaponía, las aguas residuales de los peces se consideran una fuente valiosa de fertilizantes. Dentro de un enfoque de circuito cerrado, la parte sólida descargada necesita ser minimizada (es decir, reducción orgánica maximizada), y el contenido de nutrientes en los efluentes debe ser maximizado (es decir, maximización de mineralización de nutrientes). Por lo tanto, el rendimiento del tratamiento de aguas residuales en acuaponía ya no necesita expresarse en términos de eliminación de contaminantes, sino en términos de su capacidad de reducción de contaminantes y mineralización de nutrientes.

Algunos estudios han demostrado la capacidad funcional de digerir el lodo de peces con tratamientos aeróbicos y anaeróbicos con fines de reducción orgánica (Goddek et al. 2018; van Rijn y col. 1995). Con tratamiento anaeróbico en biorreactor, se puede lograr un alto rendimiento de

reducción (por ejemplo, superior al 90%) de materia seca (es decir, TSS) mientras que también se puede producir metano (van Lier et al. 2008; Mirzoyan y Gross 2013; Yogev et al. 2016).

El tratamiento aeróbico del lodo también es una forma muy efectiva de reducir la materia orgánica, que se oxida a CO_2 durante la respiración (véase la ecuación 10.1). Por ejemplo, se informaron tasas de reducción del 90% (aquí determinado como sólidos suspendidos, reducción de DQO y DBO) desde una instalación de recuperación de recursos hídricos (Seo et al. 2017). Los procesos aeróbicos son más rápidos que los anaeróbicos, pero pueden ser más caros (Chen et al. 1997) ya que una aireación constante de la mezcla de lodo y agua requiere bombas o motores que consuman mucha energía. Además, las fracciones significativas de los nutrientes se convierten en biomasa microbiana y no permanecen disueltas en el agua.

Aunque estos estudios han demostrado el potencial de reducción orgánica del lodo de peces, solo unos pocos autores han examinado la liberación de nutrientes específicos (por ejemplo, para N y P) del lodo de pescado. La mayoría de estos estudios fueron para experimentos por lotes cortos in vitro (Conroy y Couturier 2010; Monsees et al. 2017; Stewart et al. 2006) y de un RAS operativo (Yogev et al. 2016), en lugar de una configuración acuapónica. Aunque se discutió en cierta medida en teoría (Goddek et al. 2016; Yogev et al. 2017), la investigación tiene que comenzar ahora a investigar sistemáticamente la reducción orgánica y el rendimiento de mineralización de nutrientes del lodo de peces para los reactores aeróbicos y anaerobios y su efecto sobre la composición del agua y el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, este capítulo tiene como objetivo ofrecer una visión general de los diversos tratamientos de lodo de peces que se pueden integrar en configuraciones acuapónicas para lograr la reducción orgánica y la mineralización de nutrientes. Se resaltarán algunos enfoques de diseño. Se discutirá el enfoque de balance de masa de nutrientes en el contexto del tratamiento de lodos acuapónicos, y se desarrollará una metodología específica para cuantificar el rendimiento del tratamiento de lodos.

10.2 IMPLEMENTACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN ACUAPONÍA

En acuaponía, el agua residual cargada de sólidos (es decir, el lodo) es una fuente valiosa de nutrientes, y se deben llevar a cabo los tratamientos adecuados. Los objetivos del tratamiento difieren del tratamiento convencional de aguas residuales porque en acuaponía los sólidos y la conservación del agua son de interés. Además, independientemente del

tratamiento de aguas residuales aplicado, su objetivo debe ser reducir los sólidos y al mismo tiempo mineralizar sus nutrientes. En otras palabras, el objetivo es obtener un efluente libre de sólidos, pero rico en nutrientes solubilizados (es decir, aniones y cationes) que se pueden reinsertar en el circuito de agua en una configuración acoplada (Fig. 10.1a) o directamente en los lechos de cultivo hidropónicos en una configuración desacoplada (Fig. 10.1b). Los sólidos de los lodos de los peces se componen principalmente de materia orgánica degradable, por lo que la reducción sólida puede llamarse reducción orgánica. De hecho, las moléculas orgánicas complejas (por ejemplo, proteínas, lípidos, carbohidratos, etc.) están compuestas principalmente de carbono y se reducirán sucesivamente a compuestos de menor peso molecular hasta las formas gaseosas finales de CO2 y CH4 (en el caso de la fermentación anaerobia). Durante este proceso de degradación, los macronutrientes (es decir, N, P, K, Ca, Mg y S) y los micronutrientes (es decir, Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo) que se unieron a las moléculas orgánicas se liberan en el agua en sus formas iónicas. Este fenómeno se llama lixiviación de nutrientes o mineralización de nutrientes. Se puede suponer que cuando se logra una alta reducción orgánica, también se lograría una alta mineralización de nutrientes. Por un lado, el lodo contiene una proporción de minerales no disueltos y, por otro lado, algunos macro y micronutrientes se liberan durante el proceso de mineralización. Estos pueden precipitarse rápidamente juntos y formar minerales insolubles. El estado entre los iones y los minerales precipitados de la mayoría de los macro y micronutrientes depende del pH. Los minerales más conocidos que precipitan en biorreactores son fosfato de calcio, sulfato de calcio, carbonato de calcio, pirita y estruvita (Peng et al. 2018; Zhang et al. 2016). Conroy y Couturier (2010) observaron que Ca y P se liberaron en un reactor anaeróbico cuando el pH cayó por debajo de 6. Mostraron que la liberación correspondía exactamente a la mineralización de fosfato de calcio. Goddek y col. (2018) también observaron la solubilización de P, Ca y otros macronutrientes en el reactor de capa superior de lodo anaeróbico de flujo ascendente (UASB) que se volvió ácido. Jung y Lovitt (2011) informaron una movilización de nutrientes del 90% del lodo derivado de la acuicultura a un valor de pH muy bajo de 4. En esta condición, todos los macro y micronutrientes se solubilizaron. Por lo tanto, existe un antagonismo entre la reducción orgánica y la mineralización de nutrientes. De hecho, la reducción orgánica es máxima cuando los microorganismos son activos para degradar los compuestos orgánicos, y esto ocurre a un pH en un rango de 6-8. Debido a que la lixiviación de nutrientes se produce a pH inferior a 6, para la reducción orgánica óptima y la mineralización de nutrientes, lo más eficaz sería dividir el proceso de dos etapas, es decir, una etapa de reducción orgánica a pH cercano a la neutralidad y una etapa de lixiviación de nutrientes en

condiciones ácidas. Hasta donde sabemos, aún no se ha informado de ninguna operación que utilice este enfoque de dos pasos. Esto abre un nuevo campo en el tratamiento de aguas residuales y se necesita más investigación para su implementación en acuaponía.

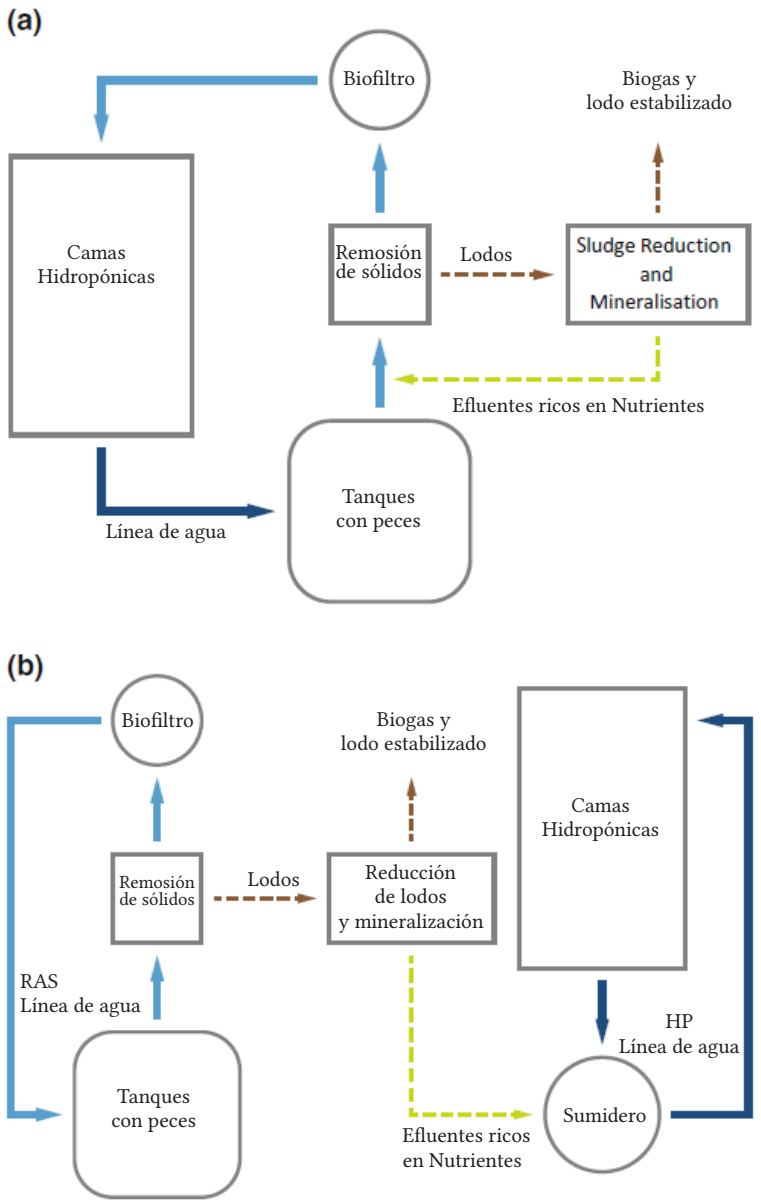


Fig. 10.1 Implementación esquemática del tratamiento de lodos en un sistema de acuaponia de circuito cerrado (a) y en un sistema de acuaponia desacoplado (b)

La elección del alimento también es importante en este contexto. En alimentos de origen animal donde una fracción principal de ingredientes todavía se basa en fuentes animales (por ejemplo, harina de pescado, harina de huesos), fosfato unido, ej. como apatita (derivado de la harina de hueso), está fácilmente disponible en condiciones ácidas, mientras que los alimentos a base de plantas contienen fitato como fuente principal de fosfato. El fitato en contraste con, ej. la apatita requiere conversión enzimática (fitasa) (Kumar et al. 2012), por lo que el fosfato no está tan fácilmente disponible.

10.3 TRATAMIENTOS AERÓBICOS

El tratamiento aeróbico mejora la oxidación del lodo al apoyar su contacto con el oxígeno. En este caso, la oxidación de la materia orgánica es impulsada principalmente por la respiración de microorganismos heterotróficos. El CO_2, el producto final de la respiración, se libera como se muestra en la ecuación. (10.1)

$$C_6H_{12}O_6+6O_2 \longrightarrow 6CO_2+6H_2O+\text{energy} \quad (10:1)$$

Este proceso en reactores aeróbicos se logra principalmente inyectando aire en la mezcla de lodo y agua con sopladores de aire conectados a difusores y hélices. La inyección de aire también asegura una mezcla adecuada del lodo.

Durante este proceso oxidativo, se liberan los macro y micronutrientes unidos a la materia orgánica. Este proceso se llama mineralización aeróbica. Por lo tanto, se pueden reciclar más nutrientes durante el proceso de mineralización, mientras que algunos nutrientes, ej. sodio y cloruro, también pueden exceder su umbral para la aplicación hidropónica y deben ser monitoreados cuidadosamente antes de la aplicación (Rakocy et al. 2007). La mineralización aeróbica de la materia orgánica, derivada de la unidad de eliminación de sólidos (por ejemplo, clarificador o filtro de tambor) en RAS, es una manera fácil de reciclar nutrientes para su posterior aplicación acuapónica. Además, durante el proceso de digestión aeróbica, el pH baja y promueve la mineralización de los minerales unidos atrapados en el lodo. Por ejemplo, Monsees et al. (2017) mostraron que el P fue liberado del lodo RAS debido a este cambio de pH. Esta disminución del pH se debe principalmente a la respiración y, en menor medida, probablemente a la nitrificación.

Debido al suministro constante de oxígeno a través de la aireación de la cámara de mineralización y la abundancia de materia orgánica, los

microorganismos heterotróficos encuentran las condiciones ideales para crecer. Esto da como resultado un aumento de la respiración y la liberación de CO2 que se disuelve en agua. El CO2 forma ácido carbónico que se disocia y, por lo tanto, reduce el pH del agua del proceso, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$CO_{2(g)}+2H_2O \longrightarrow H_3O^+ + HCO_3^- \qquad (10:2)$$

Las aguas residuales derivadas de RAS a menudo contienen NH4+ y además, se caracterizan por un pH neutro de alrededor de 7, porque el pH en RAS debe mantenerse a ese nivel para garantizar la conversión microbiana óptima de NH_4^+ a NO_3^- dentro del biofiltro (es decir, nitrificación).

El proceso de nitrificación puede contribuir a la disminución del pH en los reactores aeróbicos en la fase inicial al liberar protones al agua del proceso como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O + \text{energy} \qquad (10:3)$$

Esto es al menos válido para la fase inicial donde el pH aún está por encima de 6. A un pH de 6, la nitrificación puede disminuir significativamente o incluso cesar (Ebeling et al. 2006). Sin embargo, esto no representa un problema para la unidad de mineralización.

La disminución general del pH en la unidad de mineralización aeróbica en el proceso en curso es el principal impulsor de la liberación de nutrientes presentes en forma de minerales precipitados como fosfatos de calcio. Monsees y col. (2017) señalaron que alrededor del 50% del fosfato en el lodo era soluble en ácido, derivado de un RAS de tilapia donde se aplicó un alimento estándar que contenía harina de pescado. Aquí, alrededor del 80% del fosfato dentro del RAS se perdió por la limpieza del decantador y el descarte de la mezcla de lodo y agua. Teniendo en cuenta este hecho, el gran potencial de las unidades de mineralización para aplicaciones de acuaponía queda claro.

Las ventajas de la mineralización aeróbica son el bajo mantenimiento, sin necesidad de personal calificado y sin reoxigenación posterior. El agua enriquecida se puede usar directamente para la fertilización de las plantas, idealmente administrada por un sistema en línea para la preparación adecuada de la solución nutritiva. Una desventaja en comparación con la mineralización anaeróbica es que no se produce metano (Chen et al. 1997) y, como ya se mencionó, la mayor demanda de energía debido a la

necesidad de aireación constante.

10.3.1 Unidades de mineralización aeróbica

Un ejemplo de diseño de una unidad de mineralización aeróbica se presenta en la figura 10.2. La entrada está conectada a la unidad de eliminación de sólidos a través de una válvula, que permite el llenado discontinuo de la cámara de mineralización con una mezcla de lodo y agua.

La cámara de mineralización se airea a través del aire comprimido para promover la respiración de las bacterias heterotróficas y para mantener los procesos de desnitrificación anaeróbica lo más mínimo posible. Para evitar que el material orgánico salga de la cámara de mineralización, una placa de tamiz podría servir como barrera. Idealmente, se debe usar una segunda placa de cubierta impermeable para cubrir el tamiz durante el proceso de mineralización (durante la aireación). Esto debería evitar que la placa del tamiz se obstruya ya que durante la aireación intensa el material orgánico se movería constantemente contra la placa del tamiz. Antes de transferir el agua rica en nutrientes de la cámara de mineralización a la unidad hidropónica, se detiene la aireación para permitir que las partículas se depositen. Posteriormente, se retira la placa de cubierta y el agua enriquecida con nutrientes puede pasar a través de la placa del tamiz y salir de la cámara de mineralización a través de la salida como se sugiere en la figura 10.2. Finalmente, la placa de cubierta se vuelve a colocar, la cámara de mineralización se rellena con una mezcla de lodo y agua derivada de RAS, y el

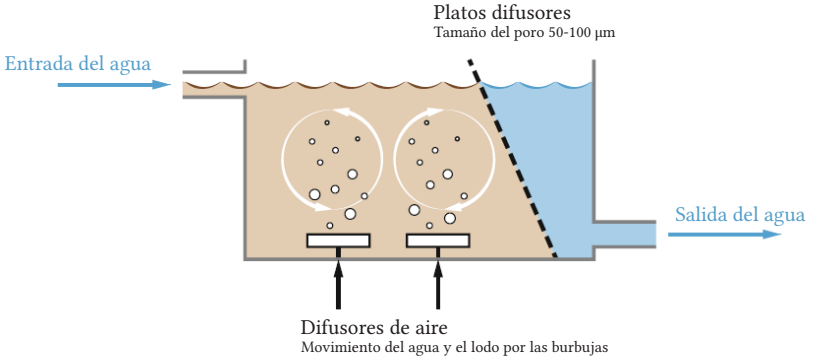


Fig. 10.2 Ejemplo esquemático de una unidad de mineralización aeróbica operada en modo discontinuo. La cámara de mineralización (marrón) está separada de la cámara de salida (azul) por una placa de tamiz que está cubierta por una placa de cubierta sólida durante el proceso de mineralización (aireación fuerte) para evitar la obstrucción y la formación de partículas finas. El agua rica en materia orgánica procedente de un clarificador o filtro de tambor entra en la unidad de mineralización a través de la entrada. Después de que se completa un ciclo de mineralización, el agua libre de sólidos y rica en nutrientes sale de la unidad de mineralización a través de la salida y se transfiere directamente a la unidad hidropónica o se mantiene en un tanque de almacenamiento hasta que sea necesario.

proceso de mineralización comienza nuevamente (es decir, proceso por lotes).

La unidad de mineralización debe tener al menos el doble del volumen del clarificador para permitir una mineralización continua. Un ciclo de mineralización puede durar hasta 5 a 30 días, dependiendo del sistema, la carga orgánica y el perfil de nutrientes requerido, y debe elaborarse para cada sistema individual. Para sistemas que incluyen un filtro de tambor, como es el caso en la mayoría de los RAS modernos, el tamaño de la unidad de mineralización debe ajustarse de acuerdo con el flujo de lodo diario o semanal del filtro de tambor. Dado que hasta ahora no se ha probado en una configuración experimental, actualmente no es posible hacer recomendaciones específicas.

La cámara de mineralización se airea a través del aire comprimido para promover la respiración de las bacterias heterotróficas y para mantener los procesos de desnitrificación anaeróbica lo más mínimo posible. Para evitar que el material orgánico salga de la cámara de mineralización, una placa de tamiz podría servir como barrera. Idealmente, se debe usar una segunda placa de cubierta impermeable para cubrir el tamiz durante el proceso de mineralización (durante la aireación). Esto debería evitar que la placa del tamiz se obstruya ya que durante la aireación intensa el material orgánico se movería constantemente contra la placa del tamiz. Antes de transferir el agua rica en nutrientes de la cámara de mineralización a la unidad hidropónica, se detiene la aireación para permitir que las partículas se depositen. Posteriormente, se retira la placa de cubierta y el agua enriquecida con nutrientes puede pasar a través de la placa del tamiz y salir de la cámara de mineralización a través de la salida como se sugiere en la figura 10.2. Finalmente, la placa de cubierta se vuelve a colocar, la cámara de mineralización se rellena con una mezcla de lodo y agua derivada de RAS, y el proceso de mineralización comienza nuevamente (es decir, proceso por lotes).

La unidad de mineralización debe tener al menos el doble del volumen del clarificador para permitir una mineralización continua. Un ciclo de mineralización puede durar hasta 5 a 30 días, dependiendo del sistema, la carga orgánica y el perfil de nutrientes requerido, y debe elaborarse para cada sistema individual. Para sistemas que incluyen un filtro de tambor, como es el caso en la mayoría de los RAS modernos, el tamaño de la unidad de mineralización debe ajustarse de acuerdo con el flujo de lodo diario o semanal del filtro de tambor. Dado que hasta ahora no se ha probado en una configuración experimental, actualmente no es posible hacer recomendaciones específicas.

10.3.2 Implementación

En la Fig. 10.3 se presenta un ejemplo de la implementación de una unidad de mineralización aeróbica en un sistema de acuaponía desacoplado. Como no se requiere tratamiento previo ni posterior (por ejemplo, reoxigenación), la unidad de mineralización se puede colocar directamente entre la unidad de eliminación de sólidos y los lechos hidropónicos. Al instalar una válvula antes y después de la unidad de mineralización, es posible una operación discontinua y la entrega de nutrientes a la unidad hidropónica a pedido, pero en muchos casos, se requeriría un tanque de almacenamiento adicional. Idealmente, después de dirigir el agua rica en nutrientes a la unidad hidropónica, el agua desplazada se reemplaza con nuevo lodo y agua de la unidad de eliminación de sólidos. Dependiendo del volumen de la unidad de mineralización, es importante tener en cuenta que volver a llenar con una nueva mezcla de lodo y agua puede conducir a un aumento del pH nuevamente y, por lo tanto, el proceso de mineralización podría interrumpirse. Al aumentar el tamaño de la unidad de mineralización, este efecto se amortiguaría.

En el estudio de Rakocy et al. (2007) investigando los desechos orgánicos líquidos de dos sistemas de acuicultura, un tiempo de retención de 29 días para la mineralización aeróbica resultó en un éxito sustancial de la mineralización. Sin embargo, esto también depende del contenido de TS dentro de la cámara de mineralización, del alimento aplicado al RAS, de la temperatura y de los requerimientos de nutrientes de las plantas que se producen dentro de la unidad hidropónica.

10.4 TRATAMIENTOS ANAEROBIOS

La digestión anaeróbica (AD) se ha utilizado durante mucho tiempo para la estabilización y reducción del proceso de masa de lodo, principalmente debido a la simplicidad de operación, los costos relativamente bajos y la producción de biogás como fuente de energía potencial. La representación estequiométrica general de la digestión anaerobia se puede describir de la siguiente manera:

$$CnHaOb + (n\text{-}a/4 - b/2)\ H_2O \longrightarrow (n/2 - a/8 + b/4)\ CO_2 + (n/2 + a/8 - b/4)\ Ch_4 \quad (10{:}4)$$

Ecuación 10.4 Balance general de masa de biogás (Marchaim 1992).

Y la concentración teórica de metano se puede calcular de la siguiente manera:

$$[CH_4] = 0.5 + (a/4+b/2)/2n \quad (10{:}5)$$

Ecuación 10.5 Concentración teórica esperada de metano en el biogás (Marchaim 1992).

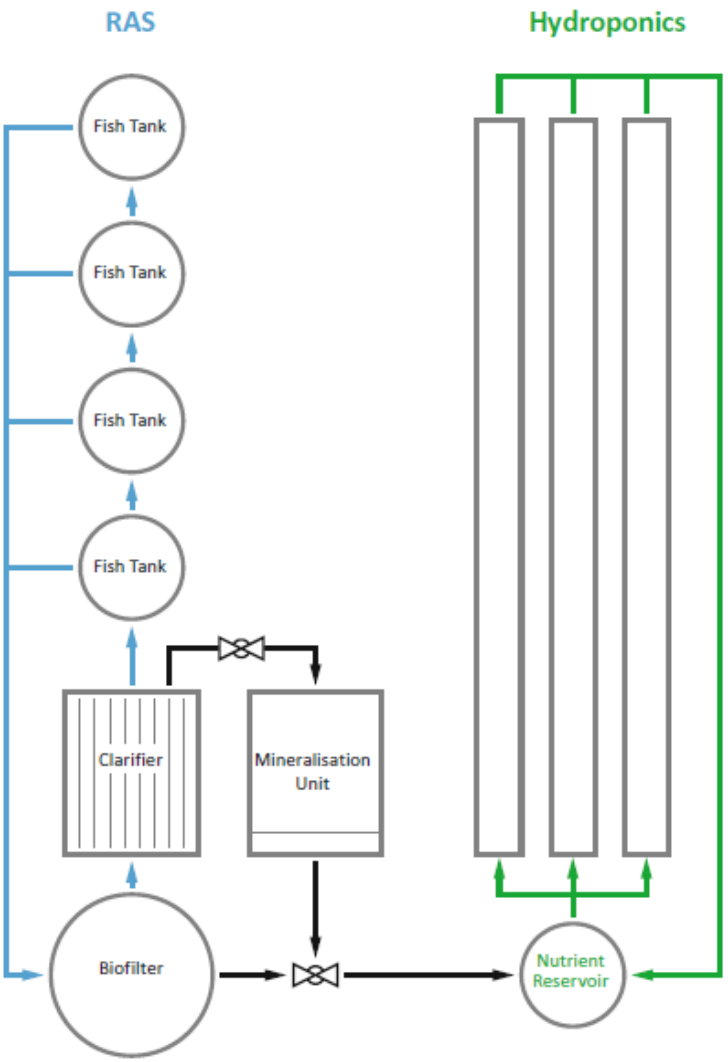


Fig. 10.3 Imagen esquemática de un sistema de acuaponía desacoplado que incluye una unidad de mineralización aeróbica. El agua se puede transferir al depósito de nutrientes desde el circuito de agua RAS o directamente desde la unidad de mineralización.

Los productos finales de AD son principalmente materiales inorgánicos (por ejemplo, minerales), compuestos orgánicos ligeramente degradados y biogás, que generalmente está compuesto de > 55% de metano (CH4) y dióxido de carbono (CO2), con solo niveles pequeños (<1%) de sulfuro de hidrógeno (H2S) y nitrógeno amoniacal total (NH3+ / NH4 +) (Appels et al. 2008).

Durante el proceso de AD, el lodo orgánico sufre cambios considerables en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y esquemáticamente puede dividirse en cuatro etapas (Fig. 10.4). La primera etapa es la hidrólisis, donde la materia orgánica compleja como lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos se degrada en sustancias orgánicas solubles (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Este paso generalmente se considera limitador de velocidad (Deublein y Steinhauser 2010). En el segundo paso de acidogénesis, los monómeros formados en el primer paso se dividen aún más, y los ácidos grasos volátiles (VFA) son producidos por bacterias acidógenas (fermentativas) junto con amoníaco, CO2, H2S y otros subproductos. El tercer paso es la acetogénesis, donde el VFA y los alcoholes son digeridos por los acetógenos para producir principalmente ácido acético, así como CO2 y H2. Esta conversión está controlada en gran medida por la presión parcial de H2 en la mezcla. El último paso es la metanogénesis, donde el metano es producido principalmente por dos grupos de bacterias metanogénicas: arqueas acetotróficas, que dividen el acetato en metano y CO2, y arqueas hidrogenotróficas, que utilizan hidrógeno como donante de electrones y dióxido de carbono como receptor de electrones para producir metano (Apelaciones et al. 2008).

Varios factores como el pH del lodo, la salinidad, la composición mineral, la temperatura, la velocidad de carga, el tiempo de retención hidráulica (HRT), la relación carbono-nitrógeno (C/N) y el contenido de ácidos grasos volátiles influyen en la digestibilidad del lodo y la producción de biogás (Khalid et al. 2011).

El tratamiento con lodos anaeróbicos de RAS comenzó hace unos 30 años con informes sobre lodos de agua dulce RAS (Lanari y Franci 1998) seguidos de informes sobre aguas marinas (Arbiv y van Rijn 1995; Klas et al. 2006; McDermott et al. 2001) y operaciones de agua salobre (Gebauer y Eikebrokk 2006; Mirzoyan et al. 2008). Recientemente, se sugirió el uso de UASB (Fig. 10.5) para AD de lodo RAS seguido de producción de biogás como una fuente alternativa de energía (Mirzoyan et al. 2010). El reactor está hecho de un tanque, parte del cual está lleno con una capa de lodo granular anaeróbico que contiene las especies de microorganismos activos. El lodo fluye hacia arriba a través de una "Manta microbiana" donde se degrada por los microorganismos anaerobios y se produce biogás.

Un asentador de cono invertido en la parte superior del digestor permite la separación gas-líquido. Cuando el biogás se libera del floc, los deflectores lo van a orientar hacia el cono. Una mezcla lenta en el reactor resulta del flujo ascendente junto con el movimiento natural de los flujos microbianos que están unidos a las burbujas de biogás. En algún momento, el floc deja la

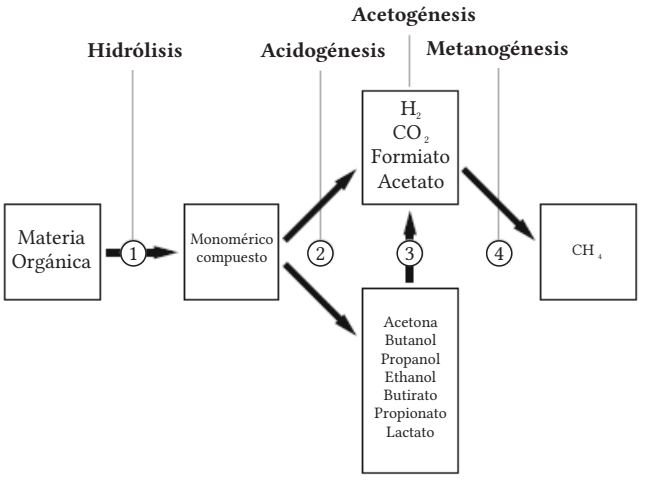
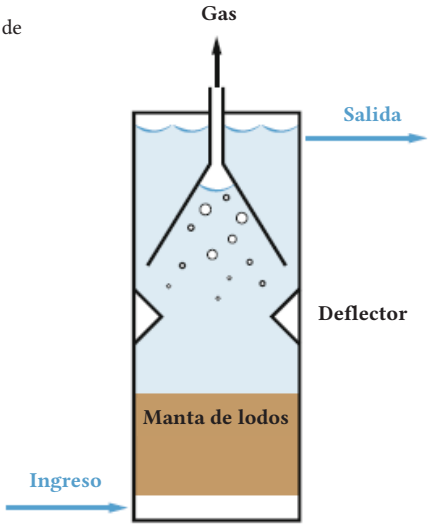


Fig. 10.4 Diagrama esquematico que muestra la degradacion anaerobica de la materia organica basada en Garcia et al. (2000).

Fig. 10.5 Esquema de un reactor anaeróbico de flujo ascendente de lodos (UASB).



burbuja de gas y se vuelve a asentar permitiendo que el efluente esté libre de TSS, que luego puede reciclarse de vuelta al sistema o liberarse.

Las principales ventajas del UASB son los bajos costos operativos y la simplicidad de operación, al tiempo que proporciona un alta (> 92%) eficiencia de eliminación de sólidos para desechos con bajo (1–3%) contenido de TSS (Marchaim 1992; Yogev et al. 2017).

Dos estudios de caso recientes demostraron el uso de UASB como tratamiento para sólidos en RAS marinos y salinos a escala piloto, que proporcionan un ejemplo de las ventajas potenciales de esta unidad en acuaponía (Tal et al. 2009; Yogev et al. 2017). Una mirada detallada al balance de carbono sugirió que aproximadamente el 50% del carbono introducido (de la alimentación) se eliminó por asimilación y respiración de los peces, el 10% se eliminó por biodegradación aeróbica en el biorreactor de nitrificación y el 10% se eliminó en el reactor de desnitrificación (Yogev et al. 2017). Por lo tanto, en general se introdujo alrededor del 25% de carbono en el reactor UASB, de los cuales el 12,5% se convirtió en metano, el 7,5% en CO2 y el resto (~ 5%) permaneció como carbono no degradable en el UASB. En resumen, se demostró que el uso de UASB permitió una mejor recirculación de agua (> 99%), una producción menor (<8%) de lodo en comparación con los RAS típicos que no tienen un tratamiento sólido en el sitio y la recuperación de energía que puede representar el 12% de la demanda total de energía del RAS. Cabe señalar que el uso de UASB en acuaponía también permitirá la recuperación significativa de hasta un 50% más de nutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, ya que se liberan en el agua como resultado de la biodegradación sólida (Goddek et al. 2018).

El biorreactor de membrana anaeróbica (AnMBR) es una tecnología más avanzada. El proceso principal consiste en usar una membrana especial para separar los sólidos del líquido en lugar de usar un proceso de decantación como en UASB. La fermentación del lodo ocurre en un tanque anaeróbico simple y los efluentes lo dejan a través de la membrana. Dependiendo del tamaño de poro de la membrana (bajando a 0.1–0.5 μm) incluso los microorganismos pueden ser retenidos. Existen dos tipos de diseño de biorreactor de membrana: uno utiliza un modo de flujo lateral fuera del tanque y el otro tiene la unidad de membrana sumergida en el tanque (Fig. 10.6), siendo este último más favorable en la aplicación de AnMBR debido a su tamaño más compacto, configuración y menor consumo de energía (Chang 2014). Las membranas de diferentes materiales como cerámica o polímero (p. Ej., Fluoruro de polivinilideno (PVDF), polietileno, polietersulfona (PES), cloruro de polivinilo (PVC)) pueden configurarse como placa y marco, fibra hueca o unidades tubulares (Gander et al. 2000; Huang et al. 2010). La AnMBR tiene varias ventajas significativas sobre los reactores biológicos típicos como el UASB, a saber, el desacoplamiento del tiempo (largo) de retención de lodos (SRT) y el tiempo (corto) de residencia hidráulica (HRT), lo que permite que el problema de la cinética lenta del proceso AD sea superior; calidad muy alta del efluente en la que permanecen la mayoría de los nutrientes; y eliminación de patógenos y una pequeña huella (Judd y Judd 2008). Además, la producción eficiente de biogás en el AnMBR posiblemente puede resultar en un balance energético neto.

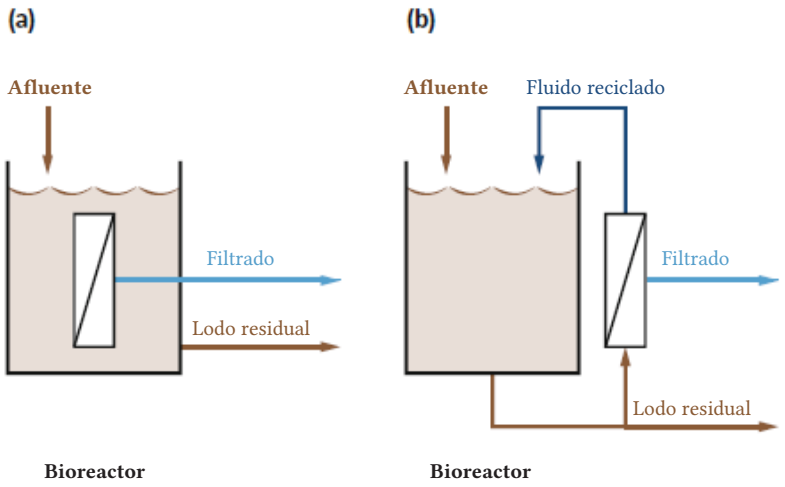


Fig. 10.6 (a) MBR de flujo lateral con una unidad de filtración separada con el fluido retenido reciclado de regreso al biorreactor; (b) MBR sumergido: unidad de filtración integrada en el biorreactor. (Gander et al. 2000)

Si bien esta tecnología merece mucha atención e investigación, debe tenerse en cuenta que, dado que es una tecnología bastante nueva, todavía hay varios inconvenientes importantes que deben abordarse antes de que la industria de la acuicultura adopte AnMBR. Estos son los altos costos operativos debido al mantenimiento de la membrana para evitar la bioincrustación, el intercambio regular de membranas y la alta fracción de CO2 (30-50%) en el biogás, lo que limita su utilización y contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Cui et al. 2003). En una nota positiva, en el futuro cercano, se desarrollarán nuevas técnicas de prevención de bioincrustación, mientras que el costo de la membrana ciertamente disminuirá con el uso más amplio de esta tecnología. La combinación de un UASB con un reactor de membrana para filtrar el efluente UASB se ha estudiado con éxito para eliminar el carbono orgánico y el nitrógeno (An et al. 2009). Esta combinación parece una opción prometedora para acuaponía para el uso seguro y sanitario de los efluentes de UASB.

10.4.1 Implementación

Una posible solución para implementar reactores anaeróbicos es de manera secuencial (ver también el Capítulo 8). Una combinación de "pH alto-pH bajo" permite recolectar metano (y, por lo tanto, reducir el carbono) en el primer paso de pH alto y movilizar nutrientes en el lodo descarbonizado en un ambiente subsecuente de pH bajo. La ventaja de este método

es que la reducción de carbono en condiciones de pH alto produce menos VFA, lo que puede ocurrir durante el segundo paso de pH bajo (Fig. 10.7). Este enfoque también permite la codigestión de la materia vegetativa verde (es decir, de cualquier cosecha de plantas, habrá residuos de materia vegetal que podrían pasar a través de un digestor de este tipo) para aumentar la producción de biogás y la recuperación de nutrientes del esquema general.

Otra posibilidad de integración técnica ha sido presentada por Ayre et al. (2017) Proponen descargar el efluente de un digestor anaeróbico de pH alto a un estanque de cultivo de algas. Dentro de ese estanque, se cultivan algas, cuya biomasa se puede utilizar para alimentación de animales de acuicultura o biofertilización (Fig. 10.8). Se puede encontrar información más detallada sobre este enfoque en el capítulo. 11).

10.5 METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR EL RENDIMIENTO DE LA REDUCCIÓN DE LODOS Y LA MINERALIZACIÓN

Para determinar la digestión del tratamiento de lodo acuaponico en biorreactores aeróbicos y anaeróbicos, se debe seguir una metodología específica. En este capítulo se presenta una metodología adaptada para fines de tratamiento de lodos acuaponicos. Se han desarrollado ecuaciones específicas para cuantificar con precisión su rendimiento (Delaide et al. 2018), y se deben utilizar para evaluar el rendimiento del tratamiento

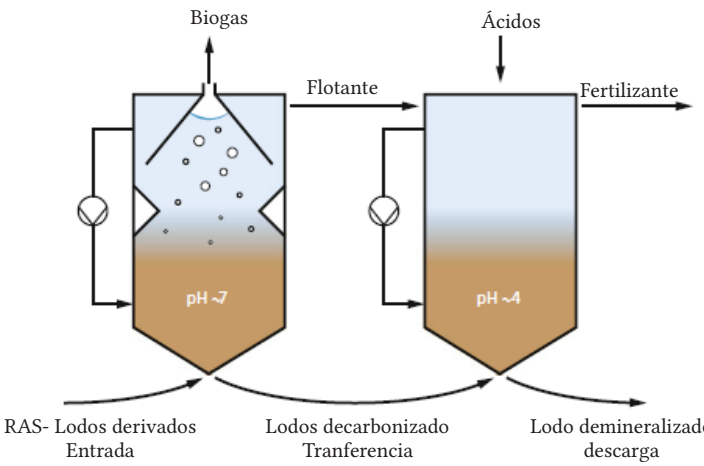


Fig. 10.7 Sistema anaeróbico de dos etapas. En la primera etapa (pH alto), el carbono se eliminará del lodo como biogás, mientras que el pH bajo en la segunda etapa permite que los nutrientes atrapados en el lodo se disuelvan en el agua. Por lo general, los ácidos grasos volátiles (VFA) se formarían en entornos de pH bajo. Sin embargo, la eliminación de la fuente de carbono en la primera etapa limita la producción de VFA en una configuración tan secuencial

aplicado en una planta acuaponica específica.

Para evaluar el rendimiento del tratamiento, se debe lograr un enfoque de equilibrio de masa. Requiere que se determinen las masas de TSS, DQO y nutrientes para todas las entradas (es decir, lodos frescos) y salidas (es decir, efluentes)de los reactores . El contenido del reactor también necesita ser muestreado al comienzo y al final del período estudiado. La entrada, la salida y el contenido de los reactores deben mezclarse perfectamente para el muestreo. La entrada y la salida del reactor deben tomarse muestras cada vez que los reactores se alimentan con lodos frescos.

Entonces, el rendimiento de reducción de lodo del reactor (η) se puede formular de la siguiente manera:

donde ΔS es el lodo dentro del reactor al final del período estudiado menos el que está al comienzo del período, Sout es el lodo total que dejó el reactor en la salida, y Sin es el lodo total que ingresó al reactor a través del flujo de entrada.

$$\eta s=100\%(1-(\Delta S+S_{out})/S_{in})) \quad (10:6)$$

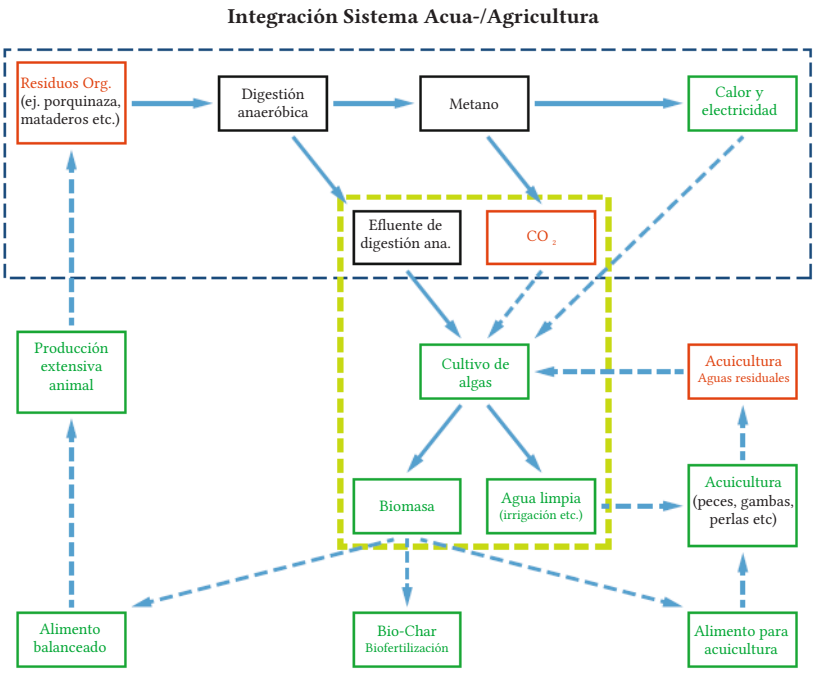


Fig. 10.8 Sistema de digestión anaerobia integrado con acuicultura y cultivo de algas basado en Ayre et al. (2017)

Para la reducción orgánica, el lodo (es decir, el término S) puede caracterizarse por la masa seca de lodo (es decir, TSS) o la masa de oxígeno necesaria para oxidar el lodo (es decir, DQO). Por lo tanto, para los rendimientos de reducción de DQO y TSS, cuanto menor es la acumulación y menor es la cantidad en el flujo de salida, mayor es el rendimiento de reducción (es decir, un alto porcentaje) y, por lo tanto, se descargan menos sólidos del circuito.

Basado en el mismo balance de masa, el rendimiento de mineralización de nutrientes del tratamiento (ζ), es decir, la conversión en iones solubles de los macro y micronutrientes presentes en el lodo bajo formas no disueltas, se puede usar la siguiente fórmula:

$$\zeta N = 100\%((DN_{out} - DN_{in})/(TN_{in} - DN_{in})) \quad (10:7)$$

donde ζ es la recuperación del nutriente de N al final del período estudiado en porcentaje, DNout es la masa total de nutriente disuelto en el flujo de salida, DNin es la masa total de nutriente disuelto en el flujo de entrada y TNin es la masa total de disuelto más nutrientes no disueltos en el flujo de entrada.

Por lo tanto, similar a los rendimientos de reducción orgánica, cuanto menor es la acumulación dentro del reactor y el contenido de nutrientes no disueltos en el flujo de salida, mayor es el rendimiento de mineralización (es decir, alto porcentaje) y, por lo tanto, el nutriente disuelto se recupera en el flujo (o flujo de salida) para el cultivo acuapónico fertilización (ver ejemplo10.1). Las ecuaciones de balance de masa presentadas se utilizan en el cuadro de ejemplo.

Ejemplo 10.1
El rendimiento de la digestión de un biorreactor anaeróbico de 250 L se ha evaluado durante un período de 8 semanas. Se alimentó una vez al día con 25 l de lodo fresco proveniente de un sistema RAS de tilapia, y el volumen (o salida) de sobrenadante equivalente se eliminó del biorreactor. El lodo fresco (entrada) tenía un TSS de 10 g de masa seca (DM) por litro o 1%, y el sobrenadante (salida) tenía un TSS de 1 gDM / L o 0.1%. El TSS dentro del biorreactor al principio y al final del período fue de 20 gDM / L. En consecuencia, el total de entradas de DM, salidas y dentro del biorreactor durante el período evaluado se calcula de la siguiente manera:

DM in = 0.01 kg/Ld x 25 L x 7 days 8 weeks = 14 kg
DM out = 0.001 kg/Ld x 25 L x 7 days 8 weeks = 1.4 kg DM to = DM tf = 250 L x 0.02 kg/L = 5 kg

El rendimiento de reducción de TSS (ηTSS) del biorreactor se puede calcular de la

siguiente manera:

$\eta TSS = 100\%(1 - ((5 \quad 5) + 1.4)/14)) = 90\%$

El rendimiento de mineralización del biorreactor P puede evaluarse sabiendo que el lodo fresco (entrada) tenía una concentración de P disuelto de 15 mg / L y un contenido total de P de 90 mg / L. La concentración de P disuelto en el sobrenadante (salida) fue de 20 mg / L. En consecuencia, el contenido total de P en la entrada, el P total disuelto en las entradas y salidas durante el período evaluado se calcula de la siguiente manera:

TP in = 0.090 g/Ld x 25 L x 7 days x 8 weeks = 126 g
DP in = 0.015 g/Ld x 25 L x 7 days x 8 weeks = 21 g
DP out = 0.020 g/Ld x 25 L x 7 days x 8 weeks = 28 g

El rendimiento de mineralización de P (ζP) del biorreactor se puede calcular de la siguiente manera:

$$\zeta P = 100\% ((28 - 21)/(126 - 21)) = 6.67\%$$

10.6 CONCLUSIONES

El tratamiento de lodos de peces para la reducción y recuperación de nutrientes se encuentra en una fase temprana de implementación. Se necesitan más investigaciones y mejoras y veremos el día con la creciente preocupación de la economía circular. De hecho, el lodo de pescado debe considerarse más como una fuente valiosa en lugar de un desecho desechable.

REFERENCIAS

An Y, Yang F, Wong FS, Chua HC (2009) Effect of recirculation ratio on simultaneous methanogenesis and nitrogen removal using a combined up-flow anaerobic sludge blanket– membrane bioreactor. Environ Eng Sci 26:1047–1053. https://doi.org/10.1089/ees.2007.0317

Appels L, Baeyens J, Degrève J, Dewil R (2008) Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Prog Energy Combust Sci 34:755. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002

Arbiv R, van Rijn J (1995) Performance of a treatment system for inorganic nitrogen removal in intensive aquaculture systems. Aquac Eng 14:189. https://doi.org/10.1016/0144-8609(94)P4435-E

Ayre JM, Moheimani NR, Borowitzka MA (2017) Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations. Algal Res 24:218–226. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.03.023

Brod E, Oppen J, Kristoffersen AØ, Haraldsen TK, Krogstad T (2017) Drying or anaerobic digestion of fish sludge: nitrogen fertilisation effects and logistics. Ambio 46:852. https://doi. org/10.1007/s13280-017-0927-5

Chang S (2014) Anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) for wastewater treatment. Adv Chem Eng Sci 4:56. https://doi.org/10.4236/aces.2014.41008

Chen SL, Coffin DE, Malone RF (1997) Sludge production and management for recirculating aquacultural systems. J World Aquac Soc 28:303–315. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1997.tb00278.x

Chowdhury P, Viraraghavan T, Srinivasan A (2010) Biological treatment processes for fish processing wastewater–a review. Bioresour Technol 101:439–449. https://doi.org/10.1016/j. biortech.2009.08.065

Conroy J, Couturier M (2010) Dissolution of minerals during hydrolysis of fish waste solids. Aquaculture 298:220–225. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.11.013

Cui ZF, Chang S, Fane AG (2003) The use of gas bubbling to enhance membrane processes. J Memb Sci. https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00246-1

Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water (Switzerland) 8. https://doi.org/10.3390/w8100467

Delaide B, Goddek S, Keesman KJ, Jijakli MH (2018) A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics. Biotechnol Agron Soc Environ 22

Deublein D, Steinhauser A (2010) Biogas from waste and renewable resources: an introduction. In: Biogas from waste and renewable resources: an introduction, 2nd edn. https://doi.org/10.1002/9783527632794

Ebeling JM, Timmons MB, Bisogni JJ (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. Aquaculture 257:346. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB, Hassan A (2010) A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. Bioresour Technol 101:1511–1517. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.040

Gander M, Je B, Judd S (2000) Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. Sep Purif Technol 18:119–130

Garcia J-L, Patel BKC, Ollivier B (2000) Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. Anaerobe 6:205.

https://doi.org/10.1006/anae.2000.0345
Gebauer R, Eikebrokk B (2006) Mesophilic anaerobic treatment of sludge from salmon smolt hatching. Bioresour Technol 97:2389–2401. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.008
Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024
Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R. (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman KJ (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water (Switzerland) 8. https://doi.org/10.3390/W8070303
Goddek S, Delaide B, Oyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralisation and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.07.003
Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156
Huang X, Xiao K, Shen Y (2010) Recent advances in membrane bioreactor technology for wastewater treatment in China. Front Environ Sci Eng China 4:245. https://doi.org/10.1007/s11783-010-0240-z
Judd S, Judd C (2008) The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-185617481-7/50005-2
Jung IS, Lovitt RW (2011) Leaching techniques to remove metals and potentially hazardous nutrients from trout farm sludge. Water Res 45:5977–5986. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.062
Khalid A, Arshad M, Anjum M, Mahmood T, Dawson L (2011) The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Manag 31:1737. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021
Klas S, Mozes N, Lahav O (2006) Development of a single-sludge denitrification method for nitrate removal from RAS effluents: lab-scale results vs. model prediction. Aquaculture 259:342. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.049
Kumar V, Sinha AK, Makkar HPS, De Boeck G, Becker K (2012) Phytate and phytase in fish nutrition. J Anim Physiol Anim Nutr (Berl) 96:335.

https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01169.x
Lanari D, Franci C (1998) Biogas production from solid wastes removed from fish farm effluents. Aquat Living Resour 11:289–295. https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)80014-4
Licamele JD (2009) Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. The University of Arizona
Marchaim U (1992) Biogas processes for sustainable development. FAO Agricultural Services Bulletin 95. Food and Agriculture Organization of the United Nations
McDermott BL, Chalmers AD, Goodwin JAS (2001) Ultrasonication as a pre-treatment method for the enhancement of the psychrophilic anaerobic digestion of aquaculture effluents. Environ Technol (United Kingdom) 22:823. https://doi.org/10.1080/095933322086180317
McGill SM (2012) 'Peak' phosphorus? The implications of phosphate scarcity for sustainable investors. J Sustain Financ Invest. https://doi.org/10.1080/20430795.2012.742635
Mirzoyan N, Gross A (2013) Use of UASB reactors for brackish aquaculture sludge digestion under different conditions. Water Res 47:2843–2850. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.02.050
Mirzoyan N, Parnes S, Singer A, Tal Y, Sowers K, Gross A (2008) Quality of brackish aquaculture sludge and its suitability for anaerobic digestion and methane production in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. Aquaculture 279:35–41. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.04.008
Mirzoyan N, Tal Y, Gross A (2010) Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems: review. Aquaculture 306:1–6. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.05.028
Monsees H, Keitel J, Paul M, Kloas W, Wuertz S (2017) Potential of aquacultural sludge treatment for aquaponics: evaluation of nutrient mobilization under aerobic and anaerobic conditions. Aquac Environ Interact 9:9–18. https://doi.org/10.3354/aei00205
Naylor SJ, Moccia RD, Durant GM (1999) The chemical composition of settleable solid fish waste (manure) from commercial rainbow trout farms in Ontario, Canada. North Am J Aquac 61:21–26
Neto RM, Ostrensky A (2013) Nutrient load estimation in the waste of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) reared in cages in tropical climate conditions. Aquac Res
46:1309–1322. https://doi.org/10.1111/are.12280
Nichols MA, Savidov NA (2012) Aquaponics: a nutrient and water efficient production system. Acta Hortic:129–132
Peng L, Dai H, Wu Y, Peng Y, Lu X (2018) A comprehensive review of phosphorus recovery from wastewater by crystallization processes. Chemosphere 197:768. https://doi.org/10.1016/j.

chemosphere.2018.01.098
Rakocy JE, Bailey DS, Shultz RC, Danaher JJ (2007) Preliminary evaluation of organic waste from two aquaculture systems as a source of inorganic nutrients for hydroponics. Acta Hortic742:201–208
Ru D, Liu J, Hu Z, Zou Y, Jiang L, Cheng X, Lv Z (2017) Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. Environ Sci Pollut Res 24:16328. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1
Saha S, Monroe A, Day MR (2016) Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (Ocimumbasilicum L.) under soilless agricultural systems. Ann Agric Sci 61:181–186. https:// doi.org/10.1016/j.aoas.2016.10.001
Schneider O, Sereti V, Eding EH, Verreth JAJ (2005) Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. Aquac Eng 32:379–401. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001
Seo KW, Choi YS, Gu MB, Kwon EE, Tsang YF, Rinklebe J, Park C (2017) Pilot-scale investi- gation of sludge reduction in aerobic digestion system with endospore-forming bacteria. Chemosphere 186:202–208. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.150
Stewart NT, Boardman GD, Helfrich LA (2006) Characterization of nutrient leaching rates from settled rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) sludge. Aquac Eng 35:191–198. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2006.01.004
Tal Y, Schreier HJ, Sowers KR, Stubblefield JD, Place AR, Zohar Y (2009) Environmentally sustainable land-based marine aquaculture. Aquaculture 286:28–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.043
Techobanoglous G, Burton FL, Stensel HD (2014) Wastewater engineering: treatment and reuse, 5th edn. Metcalf and Eddy. https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6
Turcios AE, Papenbrock J (2014) Sustainable treatment of aquaculture effluents-what can we learn from the past for the future? Sustain 6:836–856
Van Lier JB, Mahmoud N, Zeeman G (2008) Anaerobic wastewater treatment, Biological waste-water treatment: principles, modelling and design. https://doi.org/10.1021/es00154a002
Van Rijn J (2013) Waste treatment in recirculating aquaculture systems. Aquac Eng 53:49–56. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.010van Rijn J, Fonarev N, Berkowitz B (1995) Anaerobic treatment of intensive fish culture effluents: digestion of fish feed and release of volatile fatty acids. Aquaculture 133:9–20. https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)00385-2
Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, Aquaponics. Water

8:589. https://doi.org/10.3390/W8120589
Yogev U, Sowers KR, Mozes N, Gross A (2017) Nitrogen and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system. Aquaculture 467:118–126. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.04.029
Zhang X, Hu J, Spanjers H, van Lier JB (2016) Struvite crystallization under a marine/brackish aquaculture condition. Bioresour Technol 218:1151. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.088

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 11

MODELADO DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Karel J. Keesman, Oliver Körner, Kai Wagner, Jan Urban, Divas Karimanzira, Thomas Rauschenbach, and Simon Goddek

Capítulo 11

MODELADO DE SISTEMAS ACUAPÓNICOS

Karel J. Keesman, Oliver Körner, Kai Wagner, Jan Urban, Divas Karimanzira, Thomas Rauschenbach, and Simon Goddek*

Resumen

Los modelos matemáticos abstractos pueden tomar formas muy diferentes y niveles de complejidad muy diferentes. Por lo tanto, una forma sistemática de postular, calibrar y validar, según lo provisto por la teoría de sistemas, puede ser muy útil. En este capítulo, el modelado de sistemas dinámicos de sistemas acuaponicos (AP), desde una perspectiva teórica de sistemas, se considera y demuestra a cada uno de los subsistemas del sistema AP, tales como tanques de peces, digestores anaeróbicos e invernaderos hidropónicos (HP). Además, muestra los vínculos entre los subsistemas, de modo que, en principio, se puede construir e integrar un modelo completo de sistemas AP en la práctica diaria con respecto a la gestión y el control de los sistemas AP. El desafío principal es elegir un modelo de complejidad apropiado que cumpla con los datos experimentales para la estimación de parámetros y estados y nos permita responder preguntas relacionadas con el objetivo de modelado, como simulación, diseño de experimentos, predicción y control.

Palabras clave: Modelación; Sistemas de recirculación en acuicultura; Digestión anaerobia en los invernaderos hidropónicos; Herramientas del sistema acuapónico de múltiples bucles.

K. J. Keesman (*) S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands
E-mail: karel.keesman@wur.nl; simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl
O. Körner
Leibniz-Institute of Vegetable and Ornamental Crops (IGZ), Grossbeeren, Germany
E-mail: koerner@igzev.de
K. Wagner
Institut für physikalische Prozesstechnik, University of Applied Sciences Saarbrücken, Saarbrücken, Germany
E-mail: kai.wagner@htwsaar.de
J. Urban
Laboratory of Signal and Image Processing, Institute of Complex Systems, South Bohemian Research Center of Aquaculture and Biodiversity of Hydrocenoses, Faculty of Fisheries and Protection of Waters, University of South Bohemia in Ceske Budejovice, Nove Hrady, Czech Republic
E-mail: urbanj@frov.jcu.cz
D. Karimanzira · T. Rauschenbach
Fraunhofer IOSB-AST, Ilmenau, Germany
e-mail: divas.karimanzira@iosb-ast.fraunhofer.de; Thomas.Rauschenbach@iosb-ast.fraunhofer.de

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_11

11.1 INTRODUCCIÓN

En general, los modelos matemáticos pueden tomar formas muy diferentes según el sistema en estudio, que puede variar desde sistemas sociales, económicos y ambientales hasta sistemas mecánicos y eléctricos. Por lo general, los mecanismos internos de los sistemas sociales, económicos o ambientales no son muy conocidos o entendidos y, a menudo, solo hay disponibles pequeños conjuntos de datos, mientras que el conocimiento previo de los sistemas mecánicos y eléctricos es de alto nivel, y los experimentos se pueden hacer fácilmente. Además de esto, la forma del modelo también depende en gran medida del objetivo final del procedimiento de modelado. Por ejemplo, un modelo para el diseño o simulación de procesos debe contener muchos más detalles que un modelo utilizado para estudiar diferentes escenarios a largo plazo.

En particular, para una amplia gama de aplicaciones (por ejemplo, Keesman 2011), los modelos se desarrollan para:

- Obtener o ampliar la comprensión de diferentes fenómenos, por ejemplo, la recuperación de las relaciones físicas o económicas.
- Analizar el comportamiento del proceso utilizando herramientas de simulación, por ejemplo, capacitación de operadores o pronósticos meteorológicos.
- Estimar las variables de estado que no pueden medirse fácilmente en tiempo real sobre la base de mediciones disponibles, por ejemplo, información de proceso en línea.
- Control, por ejemplo, en el control interno del modelo o en el concepto de control predictivo basado en el modelo o para gestionar procesos.

Un paso crítico en el modelado de cualquier sistema es encontrar un modelo matemático que describa adecuadamente la situación o estado real. En primer lugar, deben especificarse los límites del sistema y las variables del sistema. Luego, las relaciones entre estas variables deben especificarse sobre la base de conocimientos previos, y deben hacerse suposiciones sobre las incertidumbres en el modelo. La combinación de esta información define la estructura del modelo. Aún así, el modelo puede contener algunos coeficientes desconocidos o incompletamente conocidos, los parámetros del modelo, que en caso de comportamiento variable en el tiempo definen un conjunto adicional de variables del sistema. Para una introducción general al modelado matemático nos referimos, por ejemplo, a Sinha y Kuszta (1983), Willems y Polderman (1998) y Zeigler et al. (2000).

En este capítulo, se describirá el modelado de un sistema de producción (AP) de acuaponía (alimentos). La figura 11.1 muestra un ejemplo típico de un sistema AP, es decir, el llamado sistema acuapónico de tres bucles desacoplados. Como resultado del modelado de principios básicos, usando leyes de conservación y relaciones constitutivas, los modelos matemáticos de todo tipo de sistemas AP generalmente se representan como un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. Estos modelos matemáticos se usan comúnmente para el diseño, la estimación y el control. En cada uno de estos objetivos de modelado específicos, distinguimos entre análisis y síntesis.

El bosquejo del capítulo es el siguiente. En la sección. 11.1 se presentan algunos antecedentes sobre modelado de sistemas matemáticos. Las secciones 11.2, 11.3, 11.4 y 11.5 describen el modelado de un sistema de recirculación de la acuicultura (RAS), la digestión anaeróbica, el invernadero hidropónico (HP) y un sistema de AP de bucle múltiple, respectivamente. En la sección. Las herramientas de modelado 11.6 se presentan e ilustran con algunos ejemplos. El capítulo concluye con una sección de Discusión y Conclusiones.

11.2 ANTECEDENTES

Hay muchas definiciones de un sistema disponibles, desde descripciones sueltas hasta formulaciones matemáticas estrictas. A continuación, se considera que un sistema es un objeto en el que diferentes variables interactúan en todo tipo de escalas de tiempo y espacio y que produce señales observables. Estos tipos de sistemas también se denominan sistemas abiertos. En la figura 11.2 se representa una representación gráfica de un sistema abierto general (S) con señales de entrada y salida con valor vectorial. Por lo tanto, múltiples entradas o salidas se combinan en

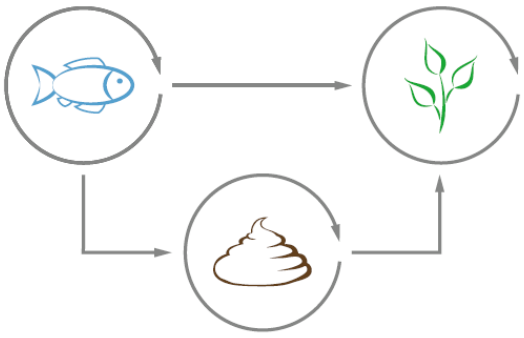


Fig. 11.1 Sistema de acuaponia de tres bucles desacoplado con subsistemas RAS, hidropónicos y de remineralización. (Goddek, 2017)

una sola flecha. Entonces, las variables del sistema pueden ser escalares o vectores. Además, pueden ser funciones de tiempo continuas o discretas. Es importante destacar que las flechas en la figura 11.2 representan flujos de señal y, por lo tanto, no necesariamente flujos físicos.

También es posible conectar sistemas a una red, como en un sistema AP, con rutas paralelas, de retroalimentación y de avance. La figura 11.3 presenta un ejemplo de dicha red. Para el análisis y la síntesis del controlador / gestión, a menudo es conveniente conectar el sistema (S) al controlador o la estrategia de gestión (C), como en la figura 11.4. Con mayor frecuencia, la entrada al controlador o la estrategia de gestión es la señal de dirección externa del sistema controlado, y la salida del sistema es el comportamiento observado del sistema.

Finalmente, para enfatizar la incorporación de un modelo matemático (M) en la estructura del controlador o la estrategia de gestión, se presenta la siguiente representación del sistema controlado basado en el modelo (Fig. 11.5).

Fig. 11.2 Representación general del sistema abierto

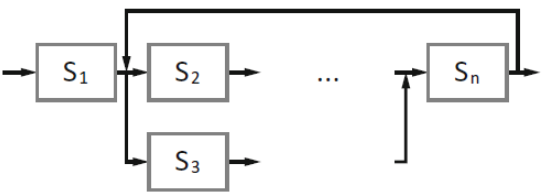


Fig. 11.3 Representación de red de sistema abierto

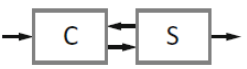


Fig. 11.4 Sistema controlado

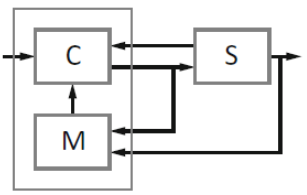


Fig. 11.5 Sistema controlado basado en modelos

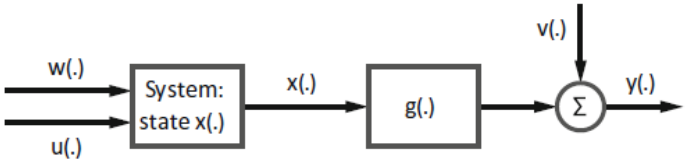


Fig. 11.6 Estructura básica del modelo matemático (M)

Por ahora, es suficiente presentar la representación del diagrama de bloques. En secciones posteriores, el modelado de los sistemas AP se trabajará con más detalle.

En la teoría de sistemas, la estructura básica de un modelo matemático (M) se representa esquemáticamente como en la figura 11.6. En la figura 11.6, x es el llamado estado del sistema, u la entrada de control, y la salida, w la entrada de perturbación y v el ruido de salida. En general, cada una de estas variables tiene un valor vectorial.

En tiempo continuo, el siguiente conjunto de ecuaciones describe un modelo dinámico general (M), con el vector de parámetros p, en lo que se denomina forma de espacio de estado:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(t;x(t);w(t);p), \quad x(0)=x_0$$
$$y(t)=g(t;x(t);u(t);p)+v(t), \quad t\epsilon\Re^{+} \qquad (11:1)$$

donde la primera ecuación describe la dinámica no lineal y variable en el tiempo del sistema en términos de variables de estado (x) y la segunda expresa la relación algebraica entre u, x e y. Esta representación del modelo de espacio de estado ha sido un punto de partida para muchas implementaciones de software para diseño, control y estimación. En lo que sigue, sin embargo, solo se consideran los modelos deterministas, por lo tanto, sin los vectores estocásticos v y w. Permítanos ilustrar esta teoría en un sistema de tanque de peces.

Ejemplo: sistema de tanque de peces considere el siguiente tanque de peces, que es un ejemplo típico del sistema general presentado en la figura 11.7.

Comencemos por especificar nuestro conocimiento previo de los mecanismos del sistema interno. El siguiente balance de masa se puede definir en términos del volumen del tanque de almacenamiento (V), también llamado estado del sistema, entradas u (t) y salidas y (t):

$$\frac{dx(t)}{dt} = u(t) - y(t) \qquad (11:2)$$

Supongamos que hay un controlador de nivel (LC) que mantiene el flujo de salida proporcional al volumen en el tanque. Esto puede hacerse cumplir implementando la siguiente ley de control proporcional, con K una constante real y positiva. Por lo tanto, después de sustituir la ecuación. (11.3) en (11.2), obtenemos la siguiente ecuación diferencial:

$$Y(t)=KV(t) \tag{11:3}$$

$$\frac{dx\,(t)}{dt}+KV(t)=u(t) \tag{11:4}$$

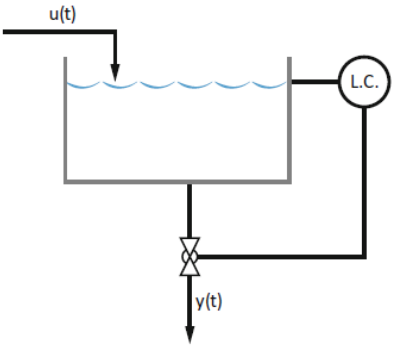


Fig. 11.7 Tanque de peces con flujo de volumen controlado utilizando el controlador de nivel (LC).

Para esta ecuación diferencial lineal específica con coeficientes constantes, existe una solución analítica y está dada por

$$Y(t)=y(0)e^{-kt}+\int_0^t Ke^{-k(t-s)}u(s)ds \tag{11:5}$$

bajo el supuesto de que u (t) = 0 para t < 0. A partir de este ejemplo, está claro que la aplicación de los primeros principios, la conservación de masas en este caso, conduce directamente a una ecuación diferencial ordinaria. En formato de espacio de estado, el modelo se puede representar como

$$\frac{dx\,(t)}{dt}+Kx(t)=u(t) \tag{11:6}$$

$$Y(t)=Kx(t)$$

Con x volumen, entrada de flujo y ganancia de controlador K. Por lo tanto, en términos del espacio de estado general Eq. (11.1), f (t, x (t), u (t); p) Kx (t) + u (t) y g (t, x (t), u (t); p) Kx (t).

Para dos tanques de peces de volumen controlado en serie con volumen V1 y V2, y ganancia de controlador K1 y K2, respectivamente, se pueden formular dos balances de masa, es decir

$$\frac{dx\,(t)}{dt}+K_1V_1(t)+u(t) \qquad \frac{dV_2(t)}{dt}=K_1V_1(t)-K_2V_2(t) \tag{11:7}$$

En forma de matriz de vectores, y para la salida física y (t), podemos escribir:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_1 & 0 \\ K_1 & -K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)\ y(t) = K_2 V_2(t) \qquad (11:8)$$

Y así con x1 = V1,x2 = V2: $f(t; x(t), u(t); p) \equiv \begin{bmatrix} -K_1 x_1(t) + u(t) \\ K_1 x_1(t) - K_2 x_2(t) \end{bmatrix}$ y g

$(t, x(t), u(t); p) \equiv K_2 x_2(t)$.

En las siguientes secciones, cada uno de los subsistemas del sistema AP (Fig. 11.1) será descrito en más detalle.

11.3 MODELADORAS

La acuicultura mundial de peces alcanzó los 50 millones de toneladas en 2014 (FAO 2016). Dada la creciente población humana, existe una creciente demanda de proteínas de pescado. El crecimiento sostenible de la acuicultura requiere nuevas tecnologías (bio) como los sistemas de recirculación de la acuicultura (RAS). Los RAS tienen un bajo consumo de agua (Orellana 2014) y permiten el reciclaje de productos excretores (Waller et al. 2015). Los RAS proporcionan condiciones de vida adecuadas para los peces, como resultado de un tratamiento de agua de varios pasos, como separación de partículas, nitrificación (biofiltración), intercambio de gases y control de temperatura. Los productos excretores disueltos y en partículas pueden transferirse a un tratamiento secundario como plantas (Waller et al. 2015) o producción de algas en sistemas integrados de acuicultura (IAAC). Los sistemas IAAC son alternativas sostenibles a los sistemas convencionales de acuicultura y, en particular, son una expansión prometedora para RAS. En RAS sería necesario hacer circular el agua del proceso, lo que tiene implicaciones especiales para la tecnología del proceso tanto en el RAS como en el sistema de algas / plantas. Para combinar RAS y el sistema de algas / plantas, un conocimiento profundo de la interacción entre el pescado y el tratamiento del agua es un requisito previo y puede derivarse del modelado dinámico. El metabolismo de los peces sigue un patrón diario que está bien representado por la tasa de evacuación gástrica (Richie et al. 2004).

La separación de partículas, la biofiltración y el intercambio de gases están sujetos al mismo patrón. Para fines de diseño, la caracterización de los componentes básicos de un sistema de tratamiento RAS debe investigarse a través de modelos de simulación. Estos modelos de simulación son

altamente complejos. Los modelos numéricos disponibles para RAS capturan solo una pequeña parte de la complejidad y consideran solo una parte de los componentes con los mecanismos correspondientes. Por lo tanto, en este capítulo, solo se presentará una pequeña parte de un modelo dinámico de RAS, es decir, biofiltración basada en nitrificación. La conversión de amoníaco tóxico en nitrato es un proceso central en el proceso de tratamiento de agua en RAS. A continuación, se demostrará el modelado dinámico del balance de masa de la excreción de amoníaco de los peces y la conversión de amoníaco en nitrato, así como la transferencia del nutriente a un sistema acuaponico. Con esto es posible no solo diseñar un RAS sino también integrar la producción de peces en un sistema IAAC basado en parámetros válidos.

11.3.1 Modelo dinámico de biofiltración basado en nitrificación en RAS

El modelo se subdivide en un modelo de peces para la lubina europea, *Dicentrarchus labrax*, un modelo que describe la excreción de amoníaco dependiente del tiempo, y un modelo de nitrificación (Fig. 11.8). El patrón de excreción de peces se introduce en el modelo a través del vector de entrada u (Ec. 11.15), similar al enfoque utilizado por Wik et al. (2009) La complejidad del modelo de peces se mantiene baja para poder explicar su método de implementación. No obstante, se presenta una breve introducción al modelado de peces en la sección. 11.3.2. Cuatro aspectos básicos importantes para describir el flujo de nutrientes en RAS (Badiola et al. 2012) son:

1. El flujo Q, que es el flujo total de agua de proceso por unidad de tiempo a través del RAS, determina la transferencia de masa de toda la materia disuelta y en partículas, incluidos el amoníaco y el nitrato.
2. La excreción del amoníaco de entrada de peces al agua de proceso RAS y se representa por el producto de la matriz B y el vector u (Ec. 11.15).
3. La conversión de amoníaco en nitrato, que tiene lugar en la nitrificación, se representa en el vector de nitrificación n (Ec. 11.15).
4. La transferencia de nutrientes del RAS a un sistema HP conectado se representa en el vector u (Ec. 11.15). Aquí no se consideran otros aspectos importantes de la cadena de proceso RAS, como la eliminación de sólidos, la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de dióxido de carbono. Las sugerencias para modelarlas se pueden encontrar en las Sectas. 3.1.1 y 3.2.2 de este libro.

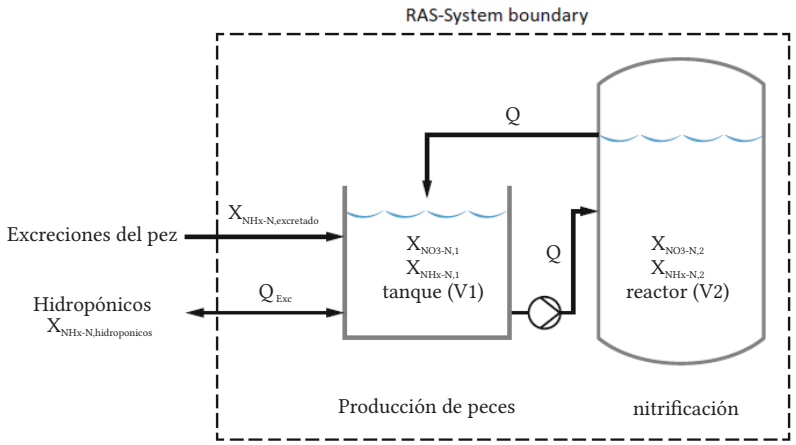


Fig. 11.8 Configuración RAS con tanque de peces, bomba, reactor de nitrificación y transferencia de agua al sistema hidropónico.

11.3.2 Pez

Una variedad de modelos en la literatura científica predicen el crecimiento y la ingesta de alimento de diferentes especies acuáticas. Los modelos describen el crecimiento como aumento de peso por día, como incremento de porcentaje de crecimiento o como tasa de crecimiento específica basada en un modelo de crecimiento exponencial. Los modelos a menudo son válidos para etapas de vida específicas. El consumo de alimento, la biomasa y el género están influyendo en la producción del modelo, así como en las condiciones ambientales, como la temperatura, el nivel de oxígeno y la concentración de nutrientes (Lugert et al. 2014). Se necesita una investigación cuidadosa para identificar el modelo correcto utilizado para la aplicación específica. Los RAS comerciales que consisten en varias cohortes de peces en diferentes etapas de la vida requieren que el modelo incorpore cohortes en el modelo (Fig. 8.6) (Halamachi y Simon 2005). El flujo de masa excretora para la lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) puede estimarse con algoritmos publicados por Lupatsch y Kissil (1998).

Aquí, el flujo de masa neta de nitrógeno en el agua del proceso se estima a partir de la composición del alimento (contenido de proteína), la cantidad de alimento dado y el nitrógeno retenido en los tejidos del cuerpo a través del crecimiento (incremento de peso) de los peces. Las pérdidas de nitrógeno fecal no se incluyen en el modelo, pero la tasa de excreción se corrige suponiendo una proporción de 0,25 y 0,75 de excreción de nitrógeno por pérdida fecal y excreción de amoníaco, respectivamente. El aporte de

nitrógeno a través de la alimentación de peces se estima a partir del contenido de proteínas y el contenido de nitrógeno relativo promedio de las proteínas, que se supone que es 0.16. El contenido de proteínas del tejido de lubina se informa en alrededor de 0,17 g de proteínas por g-1 de lubina (Lupatsch et al. 2003). Para un pez que gana peso corporal al consumir una cantidad dada de alimento, la excreción de nitrógeno ($XN,_{excretada,\ g}$) puede calcularse a partir de la ecuación (11.9). Se supone que la alimentación ($X_{alimento}$) contiene 0,5 g de proteína por g-1 de pescado. Se supone además que la tasa de conversión de alimento es igual a 1, es decir, 1 g de consumo de alimento resulta en 1 g de aumento de peso corporal (Fig. 11.9):

$$X_{N,excretado} = X_{alimento} \text{ x } 0.16 \text{ x } 0.75 \text{ x } (0.5 \text{ x } 0.17) \qquad (11.9)$$

El amoníaco disuelto excretado a través de las branquias de los peces sigue un patrón diario similar al de la tasa de evacuación gástrica (GER). He y Wurtsbaugh (1993) y Richie et al. (2004), respectivamente describen GER para peces de agua fría y tibia. El patrón excretor puede simularse bien con una función seno. La excreción de amoníaco se puede calcular a partir de la ecuación (11.10):

$$XNHx\text{-}N,excretado = XN,\ excretado\ [g]\ x\left(seno\left(\frac{2\pi}{1440}\right)+1\right) \qquad (11.10)$$

11.3.3 RAS

Se puede encontrar una variedad de modelos que describen RAS que tienen diferentes niveles de complejidad en la literatura. Existen modelos muy

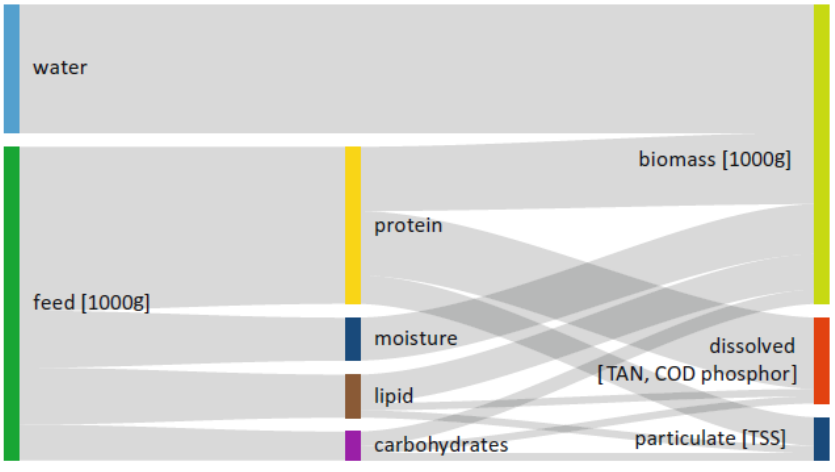


Fig. 11.9 Representación de los flujos de masa (gráfico de Sankey) de ingredientes alimenticios y productos excretores para un pez que consume 1000 g de alimento suponiendo una FCR de 1

complejos para aspectos específicos, como la interacción de gases solubles y alcalinidad (Colt 2013) o la descripción de la comunidad microbiana (Henze et al. 2002). Modelos más prácticos para el balance de masa de RAS fueron publicados por Sánchez-Romero et al. (2016), Pagand et al. (2000), Wik et al. (2009) y Weatherley et al. (1993). Todos los modelos proporcionan información sobre los flujos de masa excretoras y/o los flujos de nutrientes en función del tiempo y la ubicación en la cadena del proceso. Dichos modelos proporcionan una base para la simulación del acoplamiento de RAS y HP. La materia disuelta más importante en el modelado RAS es el nitrógeno amoniacal total (TAN). Además de TAN, la demanda química (DQO) y biológica (DBO) de oxígeno, los sólidos suspendidos totales (TSS) y la concentración de oxígeno disuelto se deben considerar. Sin embargo, las diferentes anotaciones en la literatura científica hacen que a veces sea difícil de leer, convertir e implementar la información en modelos. A continuación, serán utilizadas las anotaciones recomendadas por Corominas et al. (2010). El TAN se reescribirá como XNHx-N y el nitrógeno de nitrato se expresará como XNO3-N.11.3.4 Ejemplo de Modelo

El modelo tal como se describe a continuación solo es válido para el RAS presentado en la figura 11.8. Otras posibles cadenas de proceso para RAS se discuten en la sección 11.3 de este capítulo. Para la representación matemática de los sistemas físicos, se hicieron los siguientes supuestos:

(a) Se supone que la densidad del agua es constante.
(b) Se supone que el tanque y el reactor están bien mezclados.
(c) Se supone que el volumen del tanque y del reactor es constante.
(d) El flujo de agua del proceso siempre es mayor que cero.

La suposición de un tanque y reactor bien mezclados conduce a una ecuación de balance de masa para el reactor de tanque agitado continuo (CSTR) como lo describen Drayer y Howard (2014) en la ecuación. (11.11). Debe mencionarse que los procesos de difusión generalmente pueden descuidarse en los cálculos de RAS debido a una tasa de flujo de agua de proceso típicamente alta. Para un RAS de varios tanques, se cumple lo siguiente:

Acumulación = Flujo de entrada – flujo de salida + generación - reducción

$$V_i \dot{x}_i = Q_{\text{in}} x_{i,\text{in}} - Q_{\text{out}} x_{i,\text{out}} + x_{i,\text{gen}} - x_{i,\text{red}} \qquad (11:11)$$

$$j = \begin{cases} n, & i = 1 \\ i-1, & i \neq 1 \end{cases}$$

En la ecuación dada anteriormente, n representa el número de tanques en

el Sistema, ẋi es el cambio de concentración de un sustrato dado x en un volumen dado por Vi. El flujo de agua del proceso hacia el tanque o reactor está representado por Qin. Vi es el volumen del componente donde está entrando el flujo de agua de proceso Qin. El flujo de agua de proceso Qin proviene de un componente que tiene el volumen Vj.

La conversión de XNHx-N en XN03-N en biofiltros nitrificantes tiene lugar en la superficie A [m2] disponible en los bioportadores en el reactor de nitrificación (Rusten 2006). La superficie bioactiva disponible en la nitrificación se calcula multiplicando el volumen del reactor con la superficie del volumen de los bioportadores AS [m2 · m-3]. La superficie bioactiva total se calcula (Ec. 11.12) a partir del relleno relativo fbc del reactor de nitrificación el cálculo es 0.6 (para detalles, ver Rusten 2006).

$$A=V_{\text{nitrification}} * AS * f_{bc} \tag{11:12}$$

La conversión microbiana TAN diaria total μmax [g d^{-1}] (nitrificación) se calculó multiplicando la tasa de conversión TAN (nitrificación) específica, $NHx_{\text{tasa de conversión}}$ [g m-2 d-1], con el área de superficie activa total, A [m2], de los bioportadores. Los valores para la conversión de TAN en diferentes tipos de biofiltros nitrificantes se pueden encontrar en la literatura. Para los reactores de biofilm de lecho móvil (MBBR), Rusten (2006) informa los valores. Esta tasa es válida para ciertas condiciones del proceso, y se supone que la biopelícula bacteriana está completamente desarrollada en su conjunto.

$$\mu_{mm} = A * NHx_{\text{tasa de conversión}} \tag{11:13}$$

La masa total de NH_x convertida en NO_3-N puede calcularse posteriormente con una cinética Monod (ecuación 11.14). Para esto, se necesita la concentración de $NH_{x\text{-}N}$, $X_{NHx\text{-}N,2}$ [g l^{-1}], en el volumen del reactor de nitrificación (MBBR) V_2.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}X_{NH_x-N,2} &= -\mu_{max} * \left(\frac{X_{NH_x-N,2}}{K_s + X_{NH_x-N,2}}\right) * \frac{1}{V_2} \quad \text{with} \quad K_s = \frac{\mu_{max}}{2} \\ \frac{d}{dt}X_{N0_s-N,2} &= +\mu_{max} * \left(\frac{X_{NH_x-N,2}}{K_s + X_{NH_x-N,2}}\right) * \frac{1}{V_2} \quad \text{with} \quad K_s = \frac{\mu_{max}}{2} \end{aligned} \tag{11:14}$$

Dadas las ecuaciones. (11.9, 11.10, 11.11, 11.12, 11.13 y 11.14), el siguiente modelo de espacio de estado (que combina la nitrificación de pescado) resulta

$$\mu_{mm} = A * X + B * u + n$$

$$X = \begin{bmatrix} X_{NH_x-N,1} \\ X_{NH_x-N,2} \\ X_{NO_3-N,1} \\ X_{NO_3-N,2} \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} X_{NH_x-N,excreted} \\ \mathbf{0} \\ Q_{Exc} * X_{NH_x-N,hydroponics} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad n = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\frac{\mu_{max} * [X]_2}{K_s + [X]_2} * \frac{1}{V_2} \\ \mathbf{0} \\ +\frac{\mu_{max} * [X]_2}{K_s + [X]_2} * \frac{1}{V_2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Q}{V_1} - \frac{Q_{Exc}}{V_1} & \frac{Q}{V_1} & 0 & 0 \\ \frac{Q}{V_2} & -\frac{Q}{V_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Q}{V_1} - \frac{Q_{Exc}}{V_1} & \frac{Q}{V_1} \\ 0 & 0 & \frac{Q}{V_2} & -\frac{Q}{V_1} \end{bmatrix}$$

$$\times B = \begin{bmatrix} \frac{1}{V_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{V_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{V_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{V_2} \end{bmatrix} \quad (11:15)$$

Por ejemplo:
En este ejemplo, un RAS teórico con V_reactor = 1300 l y V_tank = 6000 l es simulado. Todas las simulaciones tuvieron un aporte diario de 2000 g/día con 500 g de proteína/kg de alimento (Ec. 11.8). Se supuso que la excreción diaria de TAN era una curva sinusoidal (Ec. 11.9). La superficie activa de los bioportadores AS es 300 [m2 m-3], y el llenado relativo del reactor fbc es 0.6. La tasa de conversión específica TAN, NHxtasa de conversión, es 1.2 [g m-2 -d], y se supone que la biopelícula está completamente desarrollada (ecuaciones 11.11 y 11.12). La representación espacio-estado (ecuación 11.14) se implementó en MATLAB Simulink. El ejemplo muestra la importancia del flujo de masa para las concentraciones de nutrientes en sistemas acoplados (Fig. 11.10 y 11.11)

11.4 MODELADO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia (AD) de material orgánico es un proceso que involucra los pasos secuenciales de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Batstone et al. 2002). La digestión anaeróbica de una mezcla de proteínas, carbohidratos y lípidos se visualiza en la figura 11.11. Muy a menudo, la hidrólisis se considera como el paso limitante en la digestión anaeróbica de la materia orgánica compleja (Pavlostathis y Giraldo-Gómez 1991). Por lo tanto, aumentar la velocidad de reacción de hidrólisis probablemente conducirá a una velocidad de reacción de

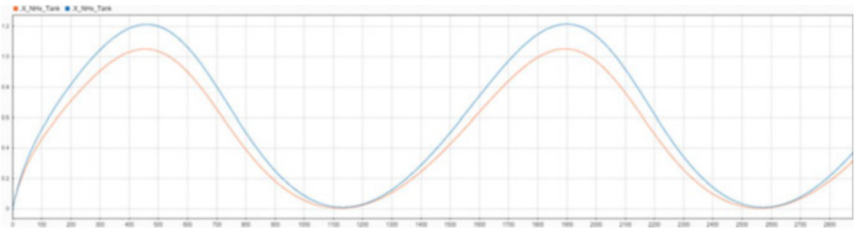


Fig. 11.10 Simulación de TAN (XNHx-N,1) en [mg/l] durante 2 días = 2880 min con Q = 300 l/min (azul) y Q = 200 l/min (naranja)

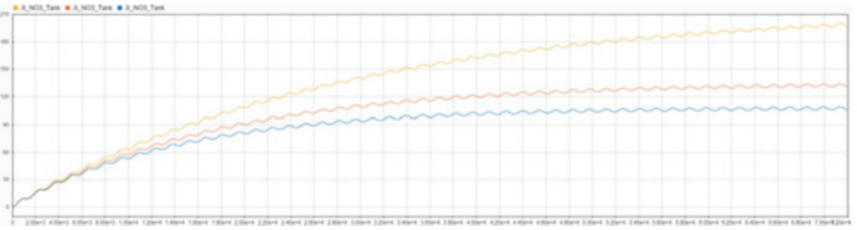


Fig. 11.11 Simulación de nitrato-N (XNO3-N,1) en [mg/l] durante 50 días = 72,000 min con QExc = 300 l/día (amarillo), QExc = 480 l/día (naranja) y QExc = 600 l/día (azul)

digestión anaeróbica más alta. Sin embargo, aumentar las velocidades de reacción necesita una mayor comprensión del proceso relacionado. Se puede obtener una mayor comprensión a través de la experimentación y/o el modelado matemático. Como hay muchos factores que influyen, por ejemplo, el proceso de hidrólisis, como la concentración de amoníaco; temperatura; composición de sustrato; tamaño de partícula; pH; intermedios; grado de hidrólisis; es decir, el potencial del contenido hidrolizable; y el tiempo de residencia, es casi imposible evaluar el efecto total de los factores sobre la velocidad de reacción de hidrólisis a través de la experimentación. Por lo tanto, el modelado matemático podría ser una alternativa, pero como resultado de todas las incertidumbres en la formulación del modelo, los coeficientes de velocidad y las condiciones iniciales, no se pueden esperar respuestas únicas. Pero, un marco de modelado matemático permitiría análisis de sensibilidad e incertidumbre para facilitar el proceso de modelado. Como se mencionó anteriormente, la hidrólisis es solo uno de los pasos en la digestión anaerobia. En consecuencia, la comprensión y la optimización del proceso completo de digestión anaerobia necesitan conexiones desde la hidrólisis a los otros procesos que tienen lugar durante la digestión anaeróbica e interacciones entre todos estos pasos.

El bien conocido y ampliamente utilizado ADM1 (modelo de digestión anaerobia #1) es un modelo estructurado que incluye los pasos de

desintegración e hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La desintegración y la hidrólisis son dos pasos extracelulares. En la etapa de desintegración, los sustratos particulados compuestos se convierten en material inerte, carbohidratos particulados, proteínas y lípidos. Posteriormente, la etapa de hidrólisis enzimática descompone los carbohidratos particulados, proteínas y lípidos en monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga (LCFA), respectivamente (Batstone et al. 2002) (ver Fig. 11.12).

ADM1 es un modelo matemático que describe los procesos biológicos y los procesos fisicoquímicos de la digestión anaeróbica como un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas (DAE). El modelo contiene 26 variables de estado dinámico en términos de concentraciones, 19 procesos cinéticos bioquímicos, 3 procesos cinéticos de transferencia de gas-líquido y 8 variables algebraicas implícitas para cada unidad de proceso. Como alternativa, Galí et al. (2009) describieron el proceso anaeróbico como un conjunto de ecuaciones diferenciales con 32 variables de estado dinámico en términos de concentraciones y 6 procesos cinéticos ácido-base adicionales por unidad de proceso. Para una visión general del modelado de los procesos de digestión anaeróbica, nos referimos a Ficara et al. (2012) Sin embargo, en lo que sigue y para algunas primeras ideas sobre el proceso de AD, presentaremos un modelo simple de equilibrio de nutrientes de AD en un reactor por lotes de secuenciación (SBR).

11.4.1 Mineralización de nutrientes

La mineralización de nutrientes se puede calcular utilizando la siguiente ecuación (Delaide et al. 2018):

$$NR = 100\% \quad x \left(\frac{Dn_{out} - DN_{in}}{TN_{in} - DN_{in}} \right) \tag{11.15a}$$

donde NR es la recuperación de nutrientes al final del experimento en porcentaje, DNout es la masa total de nutrientes disueltos en la salida, DNin es la masa total de nutrientes disueltos en la entrada y TNin es la masa total de nutrientes disueltos más no disueltos en el flujo de entrada (véase también la figura 11.13).

11.4.2 Reducción orgánica

El rendimiento de reducción orgánica del reactor se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\eta_{OM} = 1 - \frac{\Delta OM + T_{OM\ out}}{T_{OM\ in}}$$

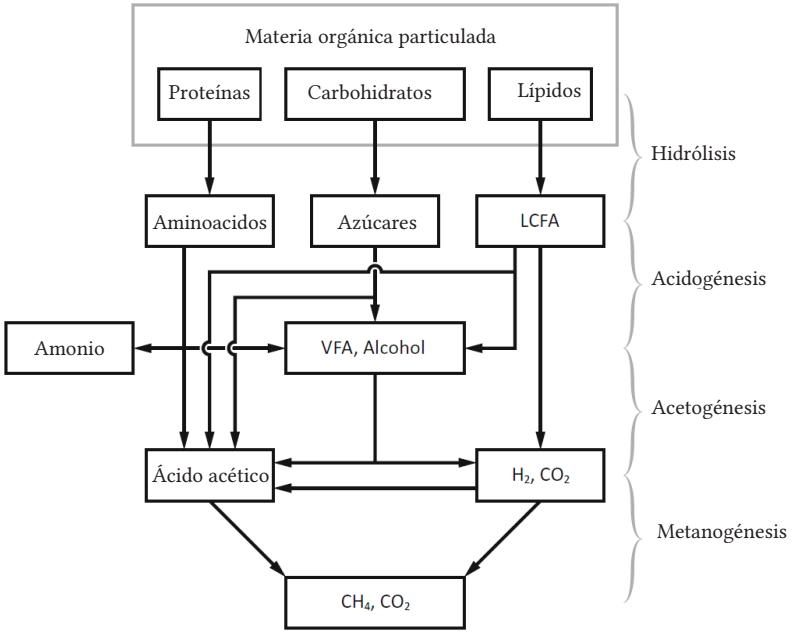


Fig. 11.12 Un esquema simplificado para la digestión anaeróbica de materia orgánica particulada compleja. (basado en El-Mashad 2003).

donde ΔOM es la materia orgánica (es decir, DQO, TS, TSS, etc.) dentro del reactor al final del experimento menos la que está al comienzo del experimento, TOMout es la salida total de OM y TOMin es el OM total flujo de entrada (véase también la figura 11.14).

Fig. 11.13 Esquema general del reactor para determinar el potencial de mineralización, donde DN son los disueltos nutrientes en el agua, UN los nutrientes no disueltos en el lodo (es decir, TN-DN) y TN los nutrientes totales

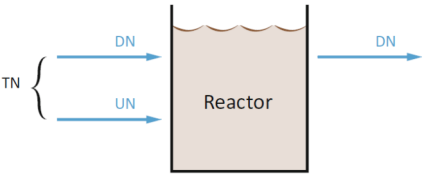
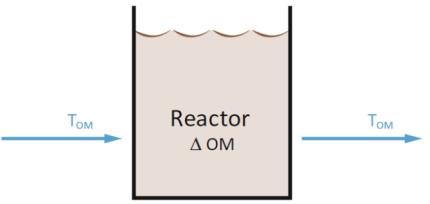


Fig. 11.14 Esquema general del reactor para determiner el potencial de reducción de material orgánico, donde T_{OM} es la materia orgánica total y ΔOM el cambio de materia orgánica dentro del reactor



11.5 MODELADO DE INVERNADEROS HP

El uso del agua del cultivo y la absorción de nutrientes es un subsistema central de acuaponía. La parte HP es compleja, ya que la absorción pura de agua y nutrientes disueltos no siguen simplemente una relación lineal bastante simple como, p ej. crecimiento de peces. Para crear un modelo completamente funcional, se necesita un simulador de invernadero completo. Esto implica sistemas submodelos de física de invernaderos que incluyen controladores climáticos y biología de cultivos que cubren procesos interactivos con estresores biológicos y físicos.

Sin embargo, desde el punto de vista de HP, el clima de invernadero es el principal impulsor del sistema de acuaponía completo, que incluye, junto a los equilibrios de nutrientes, los circuitos de retroalimentación de calor producidos por los peces y el CO2 adicional suministrado a las plantas según lo informado por Körner et al. (2017) (Fig. 11.15).

En este modelo, el cultivo de peces produce calor a través de procesos metabólicos. La cantidad de calor producida por los peces se calcula directamente a partir del consumo de oxígeno que es una función de la temperatura y una constante para la producción de calor para una unidad de oxígeno consumida (es decir, 13608 J g^{-1} pescado). Calor por descomposición de materia orgánica (Q_{bio}), p ej. las heces y el alimento permanecen, también está contribuyendo al equilibrio de calor. El suministro de energía al sistema de agua se puede calcular mediante la producción de calor a través del pescado calculado a partir de una tasa promedio de consumo de oxígeno ($f_{O2, Twb}$). La producción de calor adicional se puede calcular mediante la descomposición biológica de las heces (Fig. 11.16). La producción de CO2 del subsistema acuático (d_{CO2}, g h^{-1}), es decir, la entrega al entorno aéreo (d, g h-1), se puede calcular para la temperatura del agua dada (T_{H2O}, K) desde el suministro de oxígeno al sistema (dO2, g h-1) a la temperatura base del agua ($T_{H2O,b}$, K) y el valor Q_{10} de la respiración de peces ($Q_{10,R}$). Se utilizan las siguientes relaciones: con la cantidad de alimento para el pez (f_{pez}, g h^{-1}), tasa de consumo de oxígeno a la temperatura base (fO2, kg [O2] kg-1 [alimento]), fracción de pérdida de alimento wO_2 (-) y balance de masa de O_2 / CO_2 (-).

Para calcular la base de la acuaponía, es decir, el flujo del proceso (indicado con flechas⟶) macro clima de invernadero⟶ micro clima⟶ evapotranspiración⟶ absorción de nutrientes, varios simuladores de invernadero que se desarrollaron en el pasado pueden usarse y combinarse con la acuicultura en un sistema acuapónico. Todos los modelos de invernadero incluyen un modelo de crecimiento de cultivos. Sin embargo,

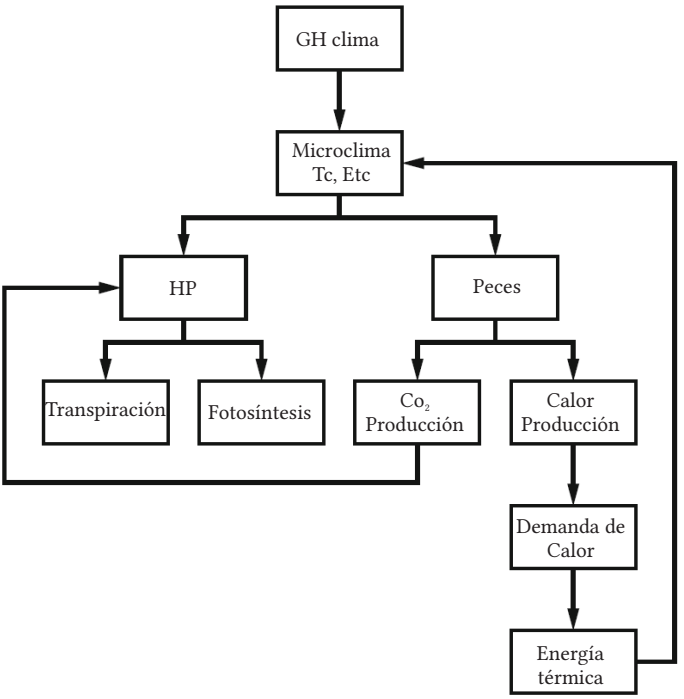


Fig. 11.15 Comportamiento simbiótico adicional de un sistema acuapónico

$$d_{O_2} = \mathrm{f_{fish}}\, \mathrm{f_{O_2}}\, \mathrm{w_{O_2}}$$
$$d_{CO_2} = \frac{[\mathrm{CO_2}]}{[\mathrm{O_2}]}\; d_{O_2}\; \mathrm{Q_{10,R}}^{\left(\mathrm{T_{H2O}} - \mathrm{T_{H2O,b}}\right)/10} \qquad (11.16)$$

la calidad del modelo puede variar mucho de los modelos de regresión empírica simples, p ej. Boote y Jones (1987), a través de modelos deterministas, p ej. Heuvelink (1996), a modelos funcionales de plantas estructurales (FSPM), p ej. Buck-Sorlin y col. (2011) Como los modelos actuales de crecimiento y desarrollo de cultivos son inexactos y tienen un poder predictivo limitado (Poorter et al. 2013), los modelos se emplean ocasionalmente en el manejo de cultivos, pero luego principalmente para problemas de planificación en simuladores de invernadero, p ej. Vanthoor (2011) y Körner y Hansen (2011). La precision de la predicción se ve comprometida por muchas fuentes de incertidumbre, como errores de modelado, variabilidad entre plantas, variabilidad entre invernaderos y condiciones climáticas externas inciertas. En cuanto a las predicciones, la precisión también varía mucho según la situación. Sin embargo, la alimentación en línea de la información del sensor al modelo de planta puede hacer que las predicciones del modelo de planta sean considerablemente mas confiables y útiles para el productor. Se

desarrollaron simuladores de invernadero en y para varios lugares, p ej. the Virtual Grower (Frantz et al. 2010), KASPRO (De Zwart 1996), Greenergy Energy Audit Tool (Körner et al. 2008), The Virtual Greenhouse (Körner and Hansen 2011), The Adaptive Greenhouse (Vanthoor 2011), Hortex (Rath 1992, 2011) y el modelo integrado de invernadero hidropónico (Goddek y Körner 2019). A nivel de investigación, se han desarrollado algunos modelos (es decir, modelos de simulación en combinación con ciertas tecnologías de invernadero) que pueden utilizarse potencialmente para optimizar inversiones y modificaciones estructurales en la unidad de producción y el proceso de producción. Sin embargo, la mayoría de los sistemas implican entornos de software cerrados que solo pueden ser utilizados por los desarrolladores, y muchos de ellos solo existen en un modo de investigación y carecen de un mayor desarrollo y aceptación por parte de la industria. Sin embargo, todavía no hay una base común para compartir modelos y desarrollar modelos colaborativos. Como resultado, la mayoría de los modeladores y equipos de modelaje trabajan de forma aislada desarrollando sus propios modelos y códigos. Una deficiencia de ese procedimiento es que los modelos de simulación de invernadero se desarrollan en paralelo en entornos de investigación dispares, que fracasan en el crecimiento y desarrollo cooperativo. Todos los simuladores de modelos de invernadero HP son una compilación de submodelos que

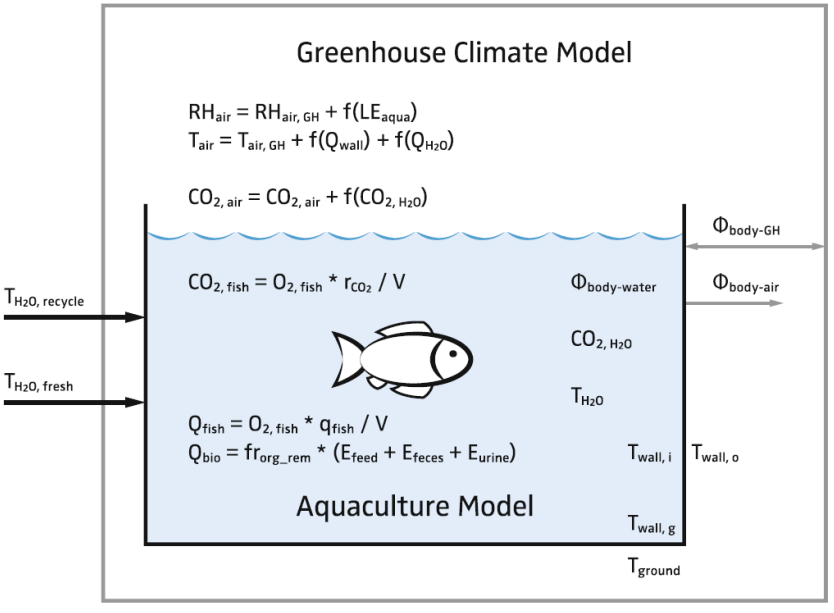


Fig. 11.16 Sistema de acuicultura implementado en el invernadero con humedad, temperatura y concentraciones de CO_2 del aire (RH_{air} T_{air}, $CO_{2,aire}$), calor del ambiente (Q) del pez (pez), descomposición biológica (bio) y flujos de calor (ϕ), tomado de Körner et al. (2017)

dependen del objetivo de integrar la interacción de plantas y equipos de invernadero.

La diferenciación general de dos partes en los modelos de invernadero y también en el control y la planificación es el brote y el entorno de la raíz. Se han realizado enfoques modelo bastante complicados y diferenciados para el clima de invernadero (Bot 1993; de Zwart 1996), y el crecimiento de cultivos de invernadero se ha modelado intensamente en la década de 1990 para los principales cultivos de invernadero como el tomate (Heuvelink 1996), el pepino (Marcelis 1994) y la lechuga (Liebig y Alscher 1993). Sin embargo, para calcular la absorción de agua y nutrientes de los cultivos, es necesario conocer el microclima, es decir, el clima cercano y sobre los órganos de las plantas (Challa y Bakker 1999). Este es un problema continuo en el modelado de invernaderos, ya que las variables de microclima, como la temperatura central de la hoja, son muy variables y dependen de muchos parámetros y variables. Una versión de un modelo de temperatura de la hoja utilizada en un dosel de cultivo para la temperatura del cultivo (Tc) integrado sobre capas verticales (z) por Körner et al. (2007) integrando flujos netos de irradiación absorbida (Rn,a, Wm-2), capa límite y resistencias de estomas (rb y rs, respectivamente, sm-1) y el déficit de presión de vapor en la superficie de la hoja (VPDs, Pa) en el dosel se muestra aquí, es decir

$$T_c(z) - T_a = \frac{\frac{1}{\rho_a c_p}(r_b(z) + r_s(z))R_{n,a}(z) - \frac{1}{\gamma}VPD_s(z)}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s(z)}{r_b(z)} + \frac{1}{\rho_a c_p / 4\sigma T_a^3}(r_b(z) + r_s(z))} \quad (11.17)$$

con temperatura del aire del invernadero (Ta, K), densidad del aire a presión de vapor (ρ_a, g m^{-2}), constante de Stefan-Boltzmann (σ, Wm-2 K-4), capacidad calorífica específica del aire (c_p, J g^{-1} K^{-1}), la constante psicrométrica (γ, Pa K^{-1}) y la pendiente entre la presión de vapor saturado y la temperatura del aire del invernadero (δ, Pa K^{-1}).

La temperatura de la hoja es la parte central del modelo de microclima, tiene bucles de retroalimentación para varias variables de entrada y especialmente la resistencia de las estomas (a menudo también se usa como su recíproco, la conductancia), y el cálculo necesita varios pasos de simulación para el equilibrio. Para HP, como parte del sistema acuapónico, sin embargo, modelar los flujos de agua y nutrientes es lo más importante. Todos los equilibrios de agua y nutrientes en un sistema cerrado de circuito múltiple se controlan en función de la tasa de evapotranspiración del cultivo ETc (cap. 8). Comúnmente, ETc se calcula como calor latente de evaporación, es decir, en términos de energía (λE, $Wm^{-2)}$, y puede estar de

acuerdo con la temperatura de la hoja expresada en diferentes capas de dosel z

$$\lambda E(z) = \left(\frac{\frac{\delta}{\gamma} R_{n,a}(z) + \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left(\frac{1}{r_b(z)} + \frac{1}{\rho_a c_p / 4\sigma T_a^3} \right) VPD_s(z)}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{r_s(z)}{r_b(z)} + \frac{1}{\rho_a c_p / 4\sigma T_a^3} (r_s(z) + r_b(z))} \right) \quad (11.18)$$

Calcular ETc (L m^{-2}), λE necesita ser multiplicado con la constant L_w (calor de vaporación de agua; 2454 103 J kg^{-1}) and y el peso específico del agua (9.789 kN m^3 a 20 ℃).

La ecuación (11.18), sin embargo, solo calcula el flujo de agua a través del cultivo, mientras que la forma más fácil de estimar la absorción de nutrientes es la suposición de que los nutrientes son absorbidos / absorbidos como disueltos en el agua de riego y suponiendo que ningún elemento sea químico, biológico o físico específico. Existen resistencias. En realidad, la absorción de nutrientes es un asunto muy complicado. En consecuencia, para mantener el equilibrio, todos los nutrientes que el cultivo recoge como están contenidos en la solución de nutrientes deben agregarse nuevamente al sistema hidropónico (ver Cap. 8). Sin embargo, la ecuación. (11.18) solo calcula la ETc potencial, mientras que niveles de potencial demasiado altos pueden dar como resultado una transpiración más alta que la que las plantas pueden manejar, y luego la pérdida potencial de agua puede exceder la absorción de agua. Por eso, la simple suposición de absorción de nutrientes no es satisfactoria. Como se describe en el cap. 10, los diferentes nutrientes pueden tener diferentes estados y cambiar de estado con, p ej. pH, mientras que la disponibilidad de la planta depende en gran medida del pH y la relación de nutrientes entre sí. Además, el microbioma en la zona de la raíz juega un papel importante, que aún no se implementa en los modelos. Sin embargo, algunos modelos diferencian entre las vías del floema y la xilema. Sin embargo, la gran cantidad de nutrientes no está modelada en detalle para el equilibrio de nutrientes de acuaponía y el tamaño de los sistemas, mientras que la forma más fácil de estimar la absorción de nutrientes es la suposición de que los nutrientes se toman / absorben como disueltos en el agua de riego y aplican el enfoque de cálculo de ETc explicado anteriormente.

Para fines de control, el invernadero generalmente se considera como una caja negra, donde las condiciones climáticas externas determinan las entradas de perturbación, el suministro de CO2, la calefacción y la ventilación son las entradas de control, y el macroclima y el microclima del invernadero definen la salida del sistema (Fig. 11.17)

Para controlar el invernadero, las acciones están dirigidas a minimizar los

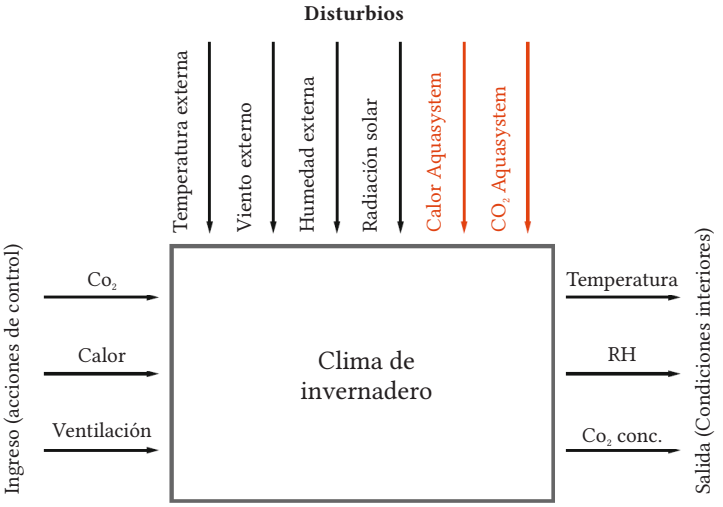


Fig. 11.17 Sistema de entrada-salida de un invernadero.

rápidos impactos de las perturbaciones, es decir, adelantarse a los cambios esperados por el control inteligente. Para eso, se utilizan acciones de control como el feedback y el feedforward (cap. 8). Sin embargo, se puede lograr el mejor control cuando se utiliza un modelo de invernadero completo y combinarlo con el pronóstico del tiempo (Körner y Van Straten, 2008) para lograr un control óptimo del clima basado en el modelo del invernadero, tal como fue elaborado por Van Ooteghem (2007).

11.6 MODELADO ACUAPÓNICO DE MÚLTIPLES LAZOS

Los diseños tradicionales de acuaponía comprenden unidades de acuacultura e hidropónicas que involucran la recirculación de agua entre ambos subsistemas (Körner et al. 2017; Graber y Junge 2009). En tales sistemas de acuaponia de un circuito, es necesario hacer compensaciones entre las condiciones de ambos subsistemas en términos de pH, temperatura y concentraciones de nutrientes, ya que los peces y las plantas comparten un ecosistema (Goddek et al. 2015). Por el contrario, los sistemas de acuaponía de doble circuito desacoplados separan las unidades RAS e hidropónicas entre sí, creando ecosistemas separados con ventajas inherentes tanto para las plantas como para los peces. Recientemente, ha habido un mayor interés en cerrar el ciclo en términos de nutrientes, así como en aumentar la eficiencia de entrada-salida. Por esa razón, la remineralización (Goddek 2017; Emerenciano et al. 2017; Goddek et al. 2018; Yogev et al. 2016) y los bucles de desalinización (Goddek y Keesman 2018) se han incorporado al diseño general del sistema. Dichos sistemas se

denominan sistema acuaponico de múltiples bucles desacoplados (Goddek et al. 2016).

El dimensionamiento de los subsistemas respectivos es fundamental para tener un sistema de verificación y equilibrio que funcione. Para dimensionar sistemas de un circuito, generalmente se usa una regla general simple, que determina el área de cultivo hidropónico en función de la entrada diaria de alimento al RAS (Knaus y Palm 2017; Licamele 2009). El mayor grado de complejidad de los sistemas de múltiples bucles ya no permite este enfoque, ya que conlleva riesgos inherentes para hacer suposiciones falsas para cada subsistema. Existe un creciente cuerpo de literatura que examina los equilibrios de masa para sistemas acuaponicos (Körner et al. 2017; Goddek et al. 2016; Reyes Lastiri et al. 2016; Karimanzira et al. 2016). Si bien se han realizado algunas investigaciones en el desarrollo de modelos numéricos para sistemas acuaponicos de uno y varios lazos, no existe un estudio único que integre un modelo de acuaponía de múltiples lazos con un modelo de invernadero determinista a escala completa complementado. Esto es particularmente relevante para dimensionar el sistema, ya que el crecimiento de las plantas y la absorción de nutrientes dependen de la ubicación con la transpiración de los cultivos como el principal impulsor. En términos concretos, esto significa que el clima dentro de un invernadero, que depende en gran medida de las condiciones climáticas externas, tiene un alto impacto en el crecimiento de las plantas dados los factores ambientales como la humedad relativa (HR), la irradiación de luz, la temperatura y el dióxido de carbono (CO2), etc. que se incorporaron en el modelo de microclima de invernadero (Körner et al. 2007; Janka et al. 2018).

11.7 HERRAMIENTAS DE MODELADO

En acuaponía, los diagramas de flujo o los diagramas de stock y flujo (SFD) y los diagramas de bucle causal (CLD) se usan comúnmente para ilustrar la funcionalidad del sistema acuapóonico. A continuación, se describirán el diagrama de flujo y las CLD

11.7.1 Diagramas de flujo

Para obtener una comprensión sistémica de la acuaponía, los diagramas de flujo con los componentes más importantes de la acuaponía son una buena herramienta para mostrar cómo fluye el material en el sistema. Esto puede ayudar, por ejemplo, a encontrar componentes faltantes y flujos desequilibrados y, principalmente, influir en los determinantes de los subprocesos. La figura 11.18 muestra un diagrama de flujo simple en

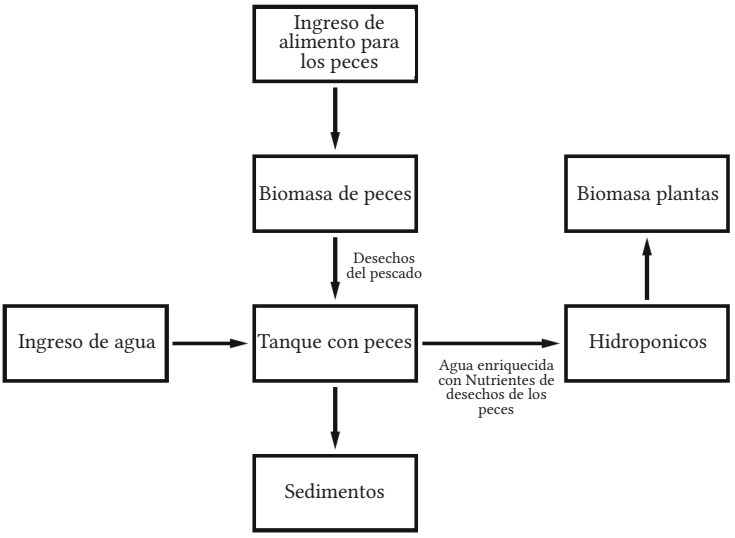


Fig. 11.18 Ejemplo de un diagrama de flujo acuapónico (solo RAS y HP de intercambio)

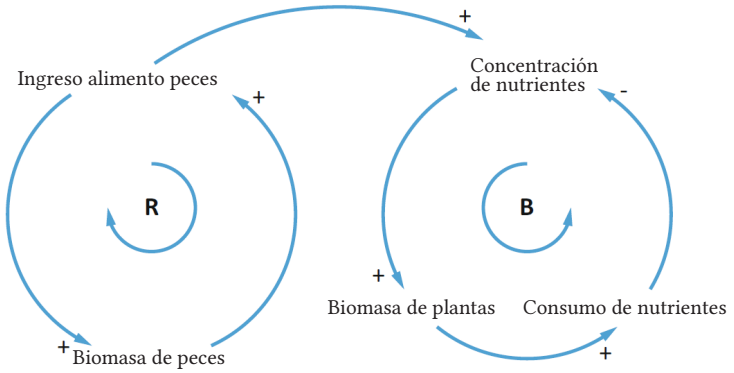


Fig. 11.19 Diagrama de bucle causal (CLD) que ilustra ejemplos de un bucle de refuerzo y equilibrado dentro de los sistemas acuaponicos. El ciclo de refuerzo (R) es aquel en el que una acción produce un resultado que influye en más de la misma acción y, en consecuencia, resulta en crecimiento o declive, mientras que un ciclo de equilibrio (B) intenta llevar las cosas al estado deseado y mantenerlas allí. (por ejemplo, regulación de la temperatura en la casa)

acuaponia. En la tabla de flujo, se agregan alimentos y agua de peces al tanque de peces, donde los peces toman el alimento para el crecimiento, el agua se enriquece con los desechos de peces y el agua enriquecida con nutrientes se agrega al sistema hidropónico para producir plantas. Biomasa A partir del diagrama de flujo, se puede construir fácilmente un CLD que se muestra en la figura 11.19.

11.7.2 Diagramas de lazo causal

Los diagramas de bucle causal (CLD) son una herramienta para mostrar la estructura de retroalimentación de un sistema (Sterman 2000). Estos diagramas pueden crear una base para comprender sistemas complejos mediante la visualización de la interconexión de diferentes variables dentro de un sistema. Al dibujar una CLD, las variables se representan como nodos. Estos nodos están conectados por bordes, que forman una conexión entre dos variables en consecuencia. La figura 11.19 muestra que dichos bordes se pueden marcar como positivos o negativos. Esto depende de la relación de las variables entre sí. Cuando ambas variables cambian en la misma dirección, se puede hablar de un vínculo causal positivo. Un vínculo causal negativo provoca un cambio en direcciones opuestas. Al conectar dos nodos desde ambos lados, uno crea un ciclo cerrado que puede tener dos características: (1) un ciclo de refuerzo que describe una relación causal, creando un crecimiento o colapso exponencial dentro del ciclo o (2) un ciclo de equilibrio en el que el ciclo causal las influencias mantienen el sistema en equilibrio. La figura 11.19 muestra un ejemplo de ambos tipos de bucles.

Vamos a ilustrar esto (Fig. 11.20) para el diagrama de flujo de la Fig. 11.18. Es obvio que CLD y SFD son muy útiles para la comprensión del sistema, cuando el modelo no requiere precisión numérica. Si se requiere precisión numérica, el proceso debe estudiarse más a fondo con un diagrama de herramienta dinámica del sistema (SDTD) y modelado en un software de simulación de sistema dinámico. Por ejemplo, el CLD en la figura 11.20 puede aumentarse con ecuaciones diferenciales a un SDTD (figura 11.21).

Desde el SDTD, ahora podemos ver cómo se ven las ecuaciones diferenciales para el equilibrio de nutrientes en el tanque. Sabemos que el flujo de nutrientes del tanque de peces (M_{xfout}) debe ser el flujo de agua (Q_{fout}) multiplicado por la concentración en la corriente de salida (C_{xf}):

$$M_{xfout} = = C_{xf}\, Q_{fout}$$

Suponiendo que un tanque agitado da la concentración de nutrientes del tanque de aletas para:

$$C_{xf} = M_{xf} / V_{f}$$

Las ecuaciones diferenciales de la parte RAS se pueden derivar a:

$$dV_{f}/dt = Q_{fin} - Q_{fout}$$
$$dM_{xf}/dt = M_{xfin} - M_{xfout},$$

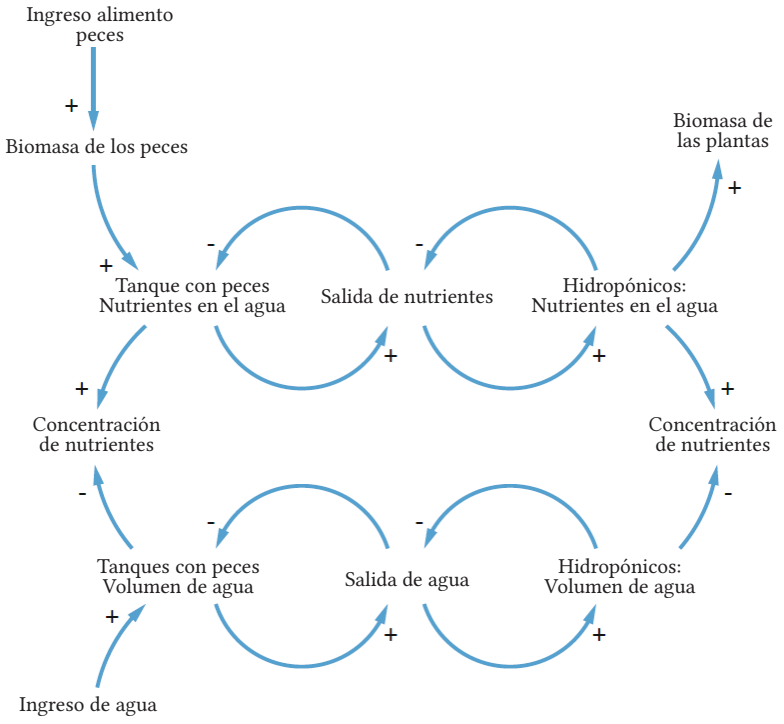


Fig. 11.20 Ejemplo CLD por RAS y HP de intercambio.

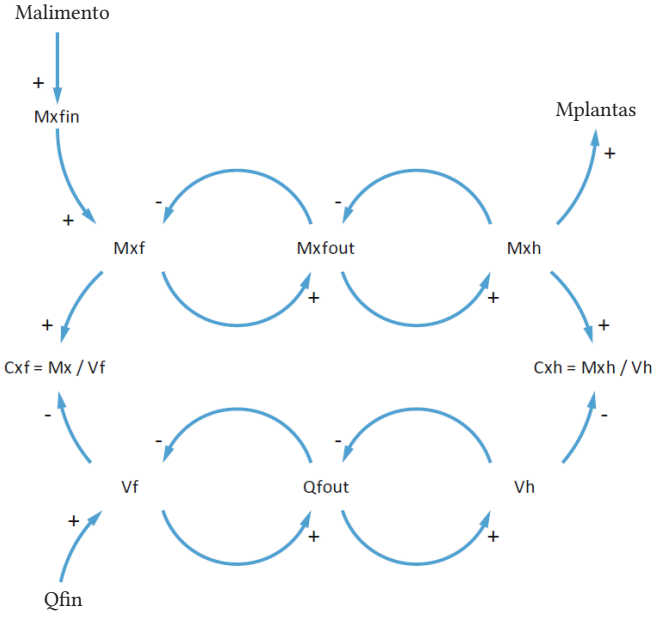


Fig. 11.21 Ejemplo SDTD para RAS y HP de intercambio.

Y para la concentración

$$Dc/dt = (Q_{fin}C_{xfin} - Q_{fout}C_{xf})/V_f$$

11.7.3 Software

Además de los lenguajes informáticos básicos, como Fortran, C ++ y Python, para un cómputo rápido y una implementación totalmente específica del usuario, hay disponibles todo tipo de herramientas de software avanzadas. Estas herramientas de software avanzadas ofrecen una variedad de entornos, conceptos y opciones. Podemos modelar variables de estado, ecuaciones diferenciales, conexiones y bucles. Además, podemos usar el modelo para simulaciones, análisis de estabilidad, optimización y control. Las principales razones para modelar un sistema son entenderlo y controlarlo. Por lo tanto, el modelo ayuda a predecir la dinámica o el comportamiento del sistema. Las aplicaciones de software podrían permitirnos realizar tres tareas consecuentes: (a) el modelado en sí, (b) las simulaciones de los modelos y (c) la optimización del modelo y / o la simulación.

El software de Matemática es para el análisis funcional de problemas descritos matemáticamente (Wolfram 1991). El concepto se basa en el enfoque LISP (McCarthy y Levin 1965.), un lenguaje de programación funcional muy efectivo. La sintaxis es razonablemente simple, y este software es popular en matemáticas, física y biología de sistemas. Especialmente, el módulo Ndsolve ayuda a resolver ecuaciones diferenciales ordinarias, trazar la solución y encontrar valores específicos.

Maple ofrece herramientas muy similares para resolver ODE. Este software es muy poderoso; entre sus características pertenecen la solución de problemas de límites, soluciones exactas y aproximaciones matemáticas. Copasi (simulador de vías complejas) es una herramienta de software para la simulación y análisis de redes bioquímicas a través de ecuaciones diferenciales ordinarias.

SageMath es un sistema de software matemático de código abierto gratuito. El software está basado en Python y facilita la simulación de modelos ODE. El software Data2Dynamics es una colección de métodos numéricos para el modelado dinámico cuantitativo y es un modelo integral y un lenguaje de descripción de datos. El software permite el análisis de predicciones de ruido, calibración e incertidumbre y tiene bibliotecas de modelos biológicos.

Probablemente el mejor lenguaje de simulación es Simula (probablemente

ya no esté en uso) y Simula 67, considerado al principio como un paquete para Algol 60. Estos fueron los primeros lenguajes totalmente orientados a objetos, introduciendo clases, herencia, subclases, recolector de basura y otros. A principios del siglo XXI, los creadores Ole-Johan Dahl y Kristen Nygaard recibieron la Medalla John von Neumann de IEEE y el Premio A. M. Turing (Dahl y Nygaard, 1966).

La idea detrás de Simula era que los objetos tienen vida; comienzan a existir, hacen su ser y cesan. Los objetos se definen como clases generales (código de plantilla), y cada instancia de dicho objeto tiene una "vida" en la simulación. El idioma era bastante difícil de aprender. Sin embargo, se ofreció la posibilidad de procesos modelo de objeto por objeto y simulación de carrera de sus vidas. La simulación se ejecuta sobre la base de eventos discretos, y es posible simular objetos en co-rutina. Se pueden iniciar, ejecutar, separar, reanudar y completar más tareas en períodos de tiempo superpuestos en procesos cuasiparalelos. El hardware de hoy nos permite modelar y simular en hilos completamente paralelos. Sin embargo, muchos de los conceptos de Simula ya se utilizaron para el desarrollo de otros lenguajes, a saber, Java, C / C ++ / C # y bibliotecas de objetos persistentes como DOL (Soukup y Machacek 2014). El sucesor actual de Simula es BETA, que se extiende y presenta las posibilidades de herencia en conceptos de (sub) clases anidadas (con hora local anidada) y patrones (Madsen et al. 1993).

Siempre es una opción usar cualquiera de los lenguajes orientados a objetos y bibliotecas específicas y programar todo el código necesario para un modelo específico. Por otro lado, los entornos de programación gráfica ya existentes permiten diseñar y vincular la estructura del sistema modelado a partir de bibliotecas de objetos (generador de señal, suma, integrador, etc.), parametrizarlos y ejecutar la simulación en tiempo virtual. Otro software popular para la simulación es MathWorks Simulink, que se describe a sí mismo como una herramienta de diseño basada en modelos. El entorno permite combinar y parametrizar bloques predefinidos (de una amplia gama de bibliotecas) y diagramas en subsistemas. La programación se realiza utilizando bloques gráficos y sus conexiones en partes funcionales con bucles de retroalimentación. El entorno es ampliamente utilizado para el control, la automatización y el procesamiento de señales. Otra posibilidad es integrar el código propio del lenguaje MathWorks Matlab o usar varias cajas de herramientas (Jablonsky et al. 2016). Uno de ellos, SensSB, se centra en el análisis de sensibilidad y permite importar otros modelos utilizando el lenguaje de marcado de biología de sistemas. Solo para la visualización de modelos existentes en Simulink, también es posible utilizar el visor de modelos muy

rápido DiffPlug. PottersWheel admite el modelado de sistemas dinámicos dependientes del tiempo, calibración de parámetros, análisis y predicción. Una herramienta interesante es el diseño experimental para la verificación del modelo.

Para el modelado y análisis de la dinámica del sistema, la aplicación de software islla Stella Architect utiliza una estrategia similar, donde el modelo está compuesto por bloques, que están conectados por relaciones. Stella permite el modelado y la simulación de muy diferentes tipos de aplicaciones, que van desde necesidades médicas hasta la construcción de edificios hasta los aviones. Stella a veces se comercializa como software iThink. El software Powersim fue diseñado originalmente para fines económicos. Sin embargo, se convirtió en una herramienta más sofisticada, que incluye simulaciones electrónicas, de energía solar o de tratamiento de drogas. El antiguo desarrollador de Powersim está produciendo actualmente un software similar para tareas más complejas Dynaplan Smia. Vensim es un sistema para modelar relaciones de big data de sistemas reales. El poder de Vensim es que permite el seguimiento causal, el análisis de sensibilidad, la calibración y la simulación intensiva. Sin embargo, el software también es capaz de manejar una amplia gama de sistemas reales simples y complejos (Hassan et al. 2016). El software de dinámica del sistema True-World facilita simulaciones dinámicas multicuerpo complejas en tiempo discreto y continuo. El modelado básicamente comienza a partir de saldos.

Los enfoques de modelado y simulación completamente diferentes son la automatización celular o los enfoques de modelado basados en agentes, popularizados por Stephen Wolfram (Wolfram 1991) como un nuevo tipo de ciencia. El enfoque a veces también se llama el juego de la vida. El modelado se implementa a través de interacciones de individuos autónomos (Macal y North 2005). Las simulaciones muestran un comportamiento emergente y, por lo tanto, son muy populares en la biología de sistemas para la dinámica de la población. Una herramienta simple para el modelado y la simulación basados en agentes básicos (y avanzados) es el software NetLogo, donde las descripciones simples y la parametrización crean modelos potentes. El software permite la visualización del desarrollo del tiempo y la inducción de ruido (Stys et al. 2015). La aplicación está escrita en Java, lo que a veces limita la memoria disponible. Probablemente el mayor esfuerzo en el modelado de múltiples agentes se realizó mediante el desarrollo del software Wolfram, que es la continuación del popular Mathematica, con herramientas extendidas para el modelado y la simulación. Ha puesto el modelado similar a Simulink en un traje más atractivo y también crea posibilidades de modelado basado en

agentes y muchas más herramientas para otras disciplinas matemáticas (estadísticas multivariadas, minería de datos, optimización global).

AnyLogic es un software muy interesante para problemas de flujo: información, dinero, tráfico, logística y minería. La simulación resuelve el problema del flujo óptimo en el sistema diseñado con un esfuerzo mínimo y una eficiencia máxima. Los conceptos utilizados son la dinámica del sistema y el modelado de eventos discretos y basados en agentes. También ofrece híbridos entre diferentes conceptos de modelado. El software es útil, por ejemplo, en las simulaciones de propagación de epidemia (Emrich et al. 2007).

Otra herramienta de modelado basada en agentes es Insight Maker, para la simulación de la población que interactúa en el espacio geográfico o de red. El software soporta la construcción de modelos gráficos, el uso de múltiples paradigmas, la creación de scripts integrados y el conjunto de herramientas de optimización (Fortmann-Roe 2014).

Para el modelado en sí, la descripción de las variables de estado, la solución de las EDO, la parametrización y el análisis de dependencia del tiempo, el primer grupo de software, desde Mathematica hasta Matlab, podrían utilizarse sin dudarlo. Representan herramientas poderosas para los propósitos de modelado. En el caso de análisis más complejos, como los relacionados con big data, simulación, inducción de ruido, optimización, sensibilidad y estocástico, se requieren herramientas más avanzadas, con enfoque orientado a objetos, que impliquen también una mayor inducción en la sintaxis de los lenguajes de programación.

11.8 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES.

La acuaponía es un complejo sistema técnico y biológico. Por ejemplo, las posibles explicaciones para los peces que no crecen adecuadamente pueden ser pequeñas raciones de alimentos, calidad adversa del agua, problemas técnicos que causan estrés, etc. Debido a la biología inherentemente lenta, las investigaciones científicas de la validez de estas explicaciones serían tediosas y requerirían varios ensayos experimentales. Para obtener todos los factores importantes y sus interacciones, exigiendo muchas instalaciones, experiencia, tiempo de investigación y activos financieros. Por lo tanto, la cuestión del modelado de sistemas acuaponicos se abordó en este capítulo. En acuaponía, se requiere modelar para diferentes objetivos: (i) conocimiento / comprensión, (ii) análisis, (iii) estimación y (iv) gestión y control. Para todos estos objetivos, se requieren modelos apropiados. Por ejemplo, para lograr los objetivos (ii) y (iii), se

puede utilizar un enfoque empírico que utiliza modelos estadísticos para analizar datos de ensayos experimentales anteriores con el objetivo de extraer la mayor cantidad de información posible sin realizar nuevos experimentos. Los modelos estadísticos pueden revelar los factores más importantes que afectan la producción de peces y cultivos en los sistemas acuaponicos. Los experimentos futuros podrían concentrarse en estos factores, haciendo que la utilización de activos de investigación costosos sea más efectiva.

La complejidad de los sistemas acuaponicos, debido a su carácter de retroalimentación y las interacciones entre RAS y el sistema hidropónico, el tratamiento del agua y el crecimiento de los peces, implica que para cumplir con los objetivos (i) y (iv), es decir, para comprender u optimizar una planta (configuración, tamaño, pescado, alimentación, flujos, etc.) con respecto al costo, estabilidad, robustez y calidad del agua, se requieren modelos teóricos no triviales de la mayoría de los componentes del sistema descritos en este capítulo.

La ventaja de estos modelos teóricos presentados sobre los modelos estadísticos es su mayor capacidad para analizar el proceso subyacente a la acuaponía y la posibilidad de modelar el aspecto del tiempo (dinámica). Los modelos estadísticos simplemente confirman o refutan una hipótesis y hasta qué punto las variables covarían, pero no dan evidencia de los procesos subyacentes. Por otro lado, los modelos teóricos nos permiten simular los procesos de acuerdo con una hipótesis, comparar los datos simulados con los observados, evaluar tanto la hipótesis como el modelo y hacer adaptaciones. La validez de los modelos estadísticos puede no estar más allá del rango operativo para el que fueron entrenados, mientras que los modelos teóricos pueden definirse y usarse para una amplia gama de entornos, siempre que los modelos estén validados para estos rangos antes de la aplicación. Por ejemplo, el modelo de regresión múltiple utilizado para evaluar las relaciones entre el crecimiento de peces con *Oreochromis niloticus* como especies de peces y variables ambientales en una instalación de acuaponía en Alemania no se puede aplicar fácilmente a España con *Cyprinus carpio*, mientras que un modelo teórico que describe los procesos subyacentes (por ejemplo, peces comportamiento, acuicultura, ecología de agua dulce) como ecuaciones matemáticas que se pueden ajustar con relativa facilidad porque el pescado y el proceso ecológico subyacentes a ese modelo son básicamente los mismos para los dos sitios.

Sin embargo, los modelos teóricos también requieren que se determinen algunos parámetros, como las constantes de reacción y la velocidad de sedimentación de la sustancia en el tanque de sedimentación. Esto se logra

comúnmente basado en el estudio empírico de una instalación o muy pocas instalaciones o en la mayoría de los casos de estudios publicados previamente (fuentes secundarias). Los estudios basados en fuentes secundarias tienen limitaciones impuestas por la estructura dada y la cantidad de datos disponibles, que no existe cuando los datos provienen de una configuración experimental diseñada ad hoc para el estudio. Sin embargo, estimar los parámetros del modelo utilizando datos experimentales de una instalación de acuaponía solo puede tener problemas con respecto a la generalización y la replicación de los resultados debido a las condiciones particulares presentes en el estudio. La escasez de datos a veces impone fuertes restricciones a los modelos que limitan su practicidad. El desarrollo de estudios para la estimación de parámetros con datos primarios que utilizan un mayor número de instalaciones de acuaponía que los estudios anteriores ayuda a superar las limitaciones actuales y proporciona resultados mejores y confiables. Esto, sin embargo, no es un desafío fácil para los investigadores de acuaponía.

La simulación de acuaponía con los modelos matemáticos en una amplia gama de condiciones de gestión mejorará la comprensión de la acuaponía, verificará las diferentes configuraciones de acuaponía y señalará el camino hacia las estrategias más prometedoras para mejorar las instalaciones de acuaponía. Nuevamente, esto puede conducir a una forma más eficiente de realizar experimentos.

Algunas herramientas de modelado también se presentaron en este capítulo. Tradicionalmente, los diagramas de stock y flujo (SFD) se han utilizado para comprender los procesos como herramientas de apoyo para el análisis cuantitativo. Se utilizan para comprender el flujo y los flujos de cantidades, pero carecen de la capacidad de ilustrar la información asociada al flujo y los flujos. El diagrama de bucle causal (CLD) se puede utilizar para transferir sistemas SFD complejos a estructuras de retroalimentación simplificadas y comprensibles. Juntos, los SFD y los CLD definen completamente el sistema de ecuaciones diferenciales. Si solo se requiere una comprensión cualitativa simple del sistema, CLD y SFD pueden ser suficientes, pero si la respuesta requiere una precisión numérica, entonces el problema puede investigarse más a fondo con diagramas de herramientas dinámicas del sistema (SDTD) y posteriormente modelarse en una herramienta de software para simulación numérica.

REFERENCIAS

Badiola M, Mendiola D, Bostock J (2012) Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: main issues on management. Aquac Eng 51:26–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004

Batstone DJ, Keller J, Angelidaki I, Kalyuzhnyi SV, Pavlostathis SG, Rozzi A, Sanders WTM, Siegrist H, Vavilin VA (2002) The IWA Anaerobic Digestion Model no 1 (ADM1). Water Sci Technol 45:65–73

Boote KJ, Jones JW (1987) Equations to define canopy photosynthesis from given quantum efficiency, maximum leaf rate, light extinction, leaf area index, and photon flux density. In: Biggins J (ed) Progress in photosynthesis research. Martinus Nijhoff, Dordrecht, pp 415–418

Bot GPA (1993) Physical modelling of greenhouse climate. In: Hashimoto Y, Bot GPA, Day W, Tantau HJ, Nonami H (eds) The computerized greenhouse. Academic Press, San Diego, pp 51–74

Buck-Sorlin G, De Visser PHB, Henke M, Sarlikioti V, Ven der Heijden G, Marcelis LFM, Vos J (2011) Towards a functional–structural plant model of cut-rose: simulation of light environ- ment, light absorption, photosynthesis and interference with the plant structure. Ann Bot 108:1121–1134

Challa H, Bakker M (1999) Potential production within the greenhouse environment. In: Stanhill G, Enoch HZ (eds) Ecosystems of the world 20 – Greenhouse ecosystems. Elsevier, pp 333–347

Colt JEK (2013) Impact of aeration and alkalinity on the water quality and product quality of transported tilapia—a simulation study. Aquac Eng:46–58

Corominas L, Riegler L, Takács I (2010) New framework for standardized notation in wastewater. J Int Assoc Water Pollut Res 61(4):S841–S857

Dahl O-J, Nygaard K (1966) SIMULA: an ALGOL-based simulation language. Commun ACM 9 (9):671–678. https://doi.org/10.1145/365813.365819

de Zwart HF (1996) Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. Wageningen Agricultural University, Wageningen, p 236

Delaide B, Goddek S, Keesman, KJ, Jijakli MH (2018). A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics. https://popups. uliege.be:443/1780-4507 22, 12

Drayer GE, Howard AM (2014) Modeling and simulation of an aquatic habitat for bioregenerative life support research. Acta Astronaut 93:S.138–S.147. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.013

El-Mashad H (2003) Solar Thermophilic Anaerobic Reactor (STAR) for renewable energy pro- duction PhD thesis Wageningen University.

ISBN: 9058089533-238
Emerenciano M, Carneiro P, Lapa M, Lapa K, Delaide B, Goddek S (2017) Mineralizacão de sólidos. Aquac Bras 21–26
Emrich S, Suslov S, Judex F (2007) Fully agent based. Modellings of epidemic spread using anylogic. In: Proceedings of the EUROSIM
FAO (2016) The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
Ficara E, Hassam S, Allegrini A, Leva A, Malpei F, Ferretti G (2012) Anaerobic digestion models: a comparative study. In: Proceedings of the 7th Vienna international conference on mathematical modelling 2012, p 1052
Fortmann-Roe S (2014) Insight maker: a general-purpose tool for web-based modeling & simula- tion. Simul Model Pract Theory 47:28–45
Frantz JM, Hand B, Buckingham L, Ghose S (2010) Virtual grower: software to calculate heating costs of greenhouse production in the United States. HortTechnology 20:778–785
Galí A, Benabdallah T, Astals S, Mata-Alvarez J (2009) Modified version of ADM1 model for agro-waste application. Bioresour Technol 100(11):2783–2790
Goddek S (2017) Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems. Wageningen University. https://doi.org/10.18174/412236
Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19. ISSN: 0144-8609
Goddek S, Keesman KJ (2018) The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. Desalination 428:76–85. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024
Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: A case study for system sizing in different environments. Agric Syst
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman KJ (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water (Switzerland) 8:303. https://doi.org/10.3390/W8070303
Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156

Halamachi I, Simon Y (2005) A novel computer simulation model for design and management of re-circulating aquaculture systems. Aquac Eng 32(3–4):S443–S464. https://doi.org/10.1016/j. aquaeng.2004.09.010

Hassan J et al (2016) Transient accumulation of NO2-and N2O during denitrification explained by assuming cell diversification by stochastic transcription of denitrification genes. PLoS Comput Biol 11(1):e1004621

He E, Wurtsbaugh W (1993) An empirical model of gastric evacuation rates for fish and an analysis of digestion in piscivorous brown trout. Trans Am Fish Soc 122(5):S.717–S.730

Henze M, Willi G, Takashi M, Mark L (2002) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d AND ASM3. IWA Publishing in its Scientific and Technical Report series, UK. ISBN:1-900222-24-8

Heuvelink E (1996) Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Department of Horticulture. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, p 326

Jablonsky J, Papacek S, Hagemann M (2016) Different strategies of metabolic regulation in cyanobacteria: from transcriptional to biochemical control. Sci Rep 6:33024

Janka E, Körner O, Rosenqvist E, Ottosen CO (2018) Simulation of PSII-operating efficiency from chlorophyll fluorescence in response to light and temperature in chrysanthemum (Dendranthema grandiflora) using a multilayer leaf model. Photosynthetica 56:633–640

Karimanzira D, Keesman KJ, Kloas W, Baganz D, Rauschenbach T (2016) Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system. Aquac Eng 75:29–45. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.10.004

Keesman KJ (2011) System identification: an introduction. Springer, London

Knaus U, Palm HW (2017) Effects of fish biology on ebb and flow aquaponical cultured herbs in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). Aquaculture 466:51–63. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.09.025

Körner O, Hansen JB (2011) An on-line tool for optimising greenhouse crop production. Acta Hortic 957:147–154

Körner O, Van Straten G (2008) Decision support for dynamic greenhouse climate control strategies. Comput Electron Agric 60:18–30

Körner O, Aaslyng JM, Andreassen AU, Holst N (2007) Modelling microclimate for dynamic greenhouse climate control. HortScience 42:272–279

Körner O, Warner D, Tzilivakis J, Eveleens-Clark B, Heuvelink E (2008) Decision support for optimising energy consumption in European greenhouses. Acta Hortic 801:803–810

Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. Acta Hortic 1170:309–31

Licamele JD (2009) Biomass production and nutrient dynamics in an aquaponics system. The University of Arizona
Liebig HP, Alscher G (1993) Combination of growth models for optimized CO2- and temperature- control of lettuce. Acta Hortic 328:155–162
Lugert V, Thaller G, Tetens J, Schulz C, Krieter J (2014) A review on fish growth calculation: multiple functions in fish production and their specific application. Rev Aquac 8(1):30–42
Lupatsch I, Kissil GW (1998) Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (Sparus aurata) culture using nutritional approach. Aquat Living Resour 11(4):265–268. https://doi.org/10.1016/S0990-7440(98)80010-7
Lupatsch I, Kissil GW, Sklan D (2003) Comparison of energy and protein efficiency among three fish species gilthead sea bream (*Sparus aurata*), European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and white grouper (Epinephelus aeneus): energy expenditure for protein and lipid deposition. Aquaculture:175–189
Macal CM, North MJ (2005) Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: Simulation conference, 2005 proceedings of the winter. IEEE
Madsen LO, Møller-Pedersen B, Nygaard K (1993) Object-oriented programming in the BETA programming language. Addison-Wesley. ISBN 0-201-62430-3
Marcelis LFM (1994) Fruit growth and dry matter partitioning in cucumber. Department of Horticulture. Wageningen Agricultural University, Wageningen, p 173
McCarthy J, Levin MI (1965) LISP 1.5 programmer's manual. MIT Press, Cambridge, MA Orellana JUW (2014) Culture of yellowtail kingfish (Seriola lalandi) in a marine recirculating aquaculture system (RAS) with artificial seawater. Aquac Eng:20–28
Pagand P, Blancheton JP, Casellas C (2000) A model for predicting the quantities of dissolved inorganic nitrogen released in effluents from a sea bass (*Dicentrarchus labrax*) recirculating water system. Aquac Eng 22(1–2):S137–S153
Pavlostathis SG, Giraldo-gomez E (1991) Kinetics of anaerobic treatment: A critical review. Crit Rev Environ Control 21:411–490
Poorter H, Anten NP, Marcelis LFM (2013) Physiological mechanisms in plant growth models: do we need a supra-cellular systems biology approach. Plant Cell Environ 36:1673–1690
Rath T (1992) Einsatz wissensbasierter Systeme zur Modellierung und Darstellung von gartenbautechnischem Fachwissen am Beispiel des hybriden Expertensystems HORTEX. Uni- versity of Hannover, Germany
Rath T (2011) Softwaresystem zur Planung von Heizanlagen von

Gewächshäusern. Fachgebiet Biosystem- und Gartenbautechnik. Leibniz University Hannover, Germany
Reyes Lastiri D, Slinkert T, Cappon HJ, Baganz D, Staaks G, Keesman KJ, (2016) Model of an aquaponic system for minimised water, energy and nitrogen requirements. Water Sci Technol. wst2016127. https://doi.org/10.2166/wst.2016.127
Richie M, Haley D, Oetker M (2004) Effect of feeding frequency on gastric evacuation and the return of appetite in tilapia Oreochromis niloticus (L.). Aquaculture 234(1–4):S657–S673. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.12.012
Rusten BE (2006) Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. Aquac Eng:322–331
Sánchez-Romero A, Miranda-Baeza A, Rivas-Vega M (2016) Development of a model to simulate nitrogen dynamics in an integrated shrimp–macroalgae culture system with zerowater exchange. J World Aquacult Soc 47(1):129–138
Sinha NK, Kuszta B (1983) Modelling and identification of dynamic systems. Von-Nostrand Reinhold, New York
Soukup J, Macháček P (2014) Serialization and persistent objects. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39323-5
Sterman J (2000) Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. McGraw Hill, Boston
Štys D, Stys D Jr, Pecenkova J, Stys KM, Chkalova M, Kouba P, Pautsina A, Durniev D, Nahlık T, Cısa P (2015) 5iD Viewer-observation of fish school behaviour in labyrinths and use ofsemantic and syntactic entropy for school structure definition. World Acad Sci Eng Technol Int J Comput Electr Autom Control Inf Eng 9(1):281–285
Van Ooteghem RJC (2007) Optimal control design for a solar greenhouse. Wageningen University, Wageningen, p 304
Vanthoor B (2011) A model-based greenhouse design method. Wageningen University, Wageningen, p 307
Waller U, Buhmann AK, Ernst A et al (2015) Integrated multi-trophic aquaculture in a zero- exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte produc- tion. Aquac Int 23:1473
Weatherley LR, Hill RG, Macmillan KJ (1993) Process modelling of an intensive aquaculture system. Aquac Eng:215–230
Wik TEI, Lindén BT, Wramner PI (2009) Integrated dynamic aquaculture and wastewater treatment modelling for recirculating aquaculture systems. Aquaculture 287(3/4):361–370
Willems JC, Polderman JW (1998) Introduction to mathematical systems theory: a behavioral approach. Springer. ISBN: 978-1-4757-2953-5
Wolfram S (1991) Mathematica: a system for doing mathematics by computer. Wolfram Research, Champagne

Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, aquaponics. Water 8:589. https://doi.org/10.3390/W8120589

Zeigler BP, Praehofer H, Kim TG (2000) Theory of modeling and simulation, 2nd edn. Elsevier, London

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 12

ACUAPONÍA: TIPOS Y ENFOQUES ALTERNATIVOS

Benz Kotzen, Maurício Gustavo Coelho Emerenciano, Navid Moheimani, y Gavin M. Burnell

Capítulo 12

ACUAPONÍA: TIPOS Y ENFOQUES ALTERNATIVOS

Benz Kotzen, Maurício Gustavo Coelho Emerenciano, Navid Moheimani, y Gavin M. Burnell

Resumen
Si bien la acuaponía se puede considerar en la etapa intermedia de desarrollo, hay una serie de nuevos métodos aliados de producción de alimentos que se alinean junto con la acuaponía y que también pueden fusionarse con la acuaponía para entregar alimentos de manera eficiente y productiva. Estas tecnologías incluyen algasponía, aeroponía, aeroacuaponía, maraponía, haloponía, tecnología biofloc y acuaponia vertical. Aunque algunos de estos sistemas han pasado por muchos años de ensayos e investigación, en la mayoría de los casos, se requiere mucha más investigación científica para comprender los procesos intrínsecos dentro de los sistemas, la eficiencia, los aspectos de diseño, etc., además de la capacidad, las capacidades y los beneficios de la unión de. Estos sistemas con acuaponía.

Palabras clave Alternativas de acuaponía; Algasponia; Aeroponía; Aeroacuaeroponicos Tecnologías bioflocales; Digeponicos; Haloponicos; Maraponicos; Vermiponicos; Acuaponía vertical.

12.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo analiza una serie de tecnologías clave aliadas y alternativas que se expanden o tienen el potencial de expandir la funcionalidad / productividad de los sistemas acuaponicos o son tecnologías asociadas /

B. Kotzen (*)
School of Design, University of Greenwich, London, UK
E-mail: b.kotzen@greenwich.ac.uk
M. G. C. Emerenciano
Santa Catarina State University (UDESC), Aquaculture Laboratory (LAQ), Laguna, SC, Brazil CSIRO Agriculture and Food, Aquaculture Program, Bribie Island Research Centre, Bribie Island, QLD, Woorim, Australia
E-mail: mauricio.emerenciano@csiro.au
N. Moheimani
Algae R&D Centre Director, School of Veterinary and Life Sciences, Murdoch University, Murdoch, WA, Australia
E-mail: n.moheimani@murdoch.edu.au
G. M. Burnell
School of Biological, Earth and Environmental Sciences, University College Cork, Cork, Ireland
E-mail: g.burnell@ucc.ie

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_12

independientes que pueden vincularse a la acuaponia. La creación y el desarrollo de estos sistemas tienen en su núcleo la capacidad, entre otras cosas, de aumentar la producción, reducir el desperdicio y la energía y, en la mayoría de los casos, reducir el uso del agua. A diferencia de la acuaponia, que puede verse en una etapa de desarrollo media / adolescente, los nuevos enfoques que se analizan a continuación están en su infancia. Sin embargo, esto no significa que no sean tecnologías valiosas por derecho propio y que tengan el potencial de entregar alimentos en el futuro, de manera eficiente y sostenible. Los métodos que se discuten a continuación incluyen aeroponía, aeroacuaponía, algasponia, tecnología biofloc para acuaponia, maraponia, y haloponia y acuaponia vertical.

12.2 AEROPONIA

12.2.1 Antecedentes

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE.UU. (NASA) describe la aeroponía *como el proceso de cultivar plantas suspendidas en el aire sin tierra o medios* proporcionando *una producción de alimentos limpia, eficiente y rápida.* Además, la NASA señala que *los cultivos se pueden plantar y cosechar durante todo el año sin interrupción y sin contaminación del suelo, pesticidas y residuos, y que los sistemas aeropónicos también reducen el uso de agua en un 98%, el uso de fertilizantes en un 60% por ciento y eliminan el uso de pesticidas por completo. Se ha demostrado que las plantas cultivadas en sistemas aeropónicos absorben más minerales y vitaminas, haciendo que las plantas sean más saludables y potencialmente más nutritivas* (NASA Spinoff). Se considera que otras ventajas de la aeroponía son:

- El ambiente de crecimiento puede mantenerse limpio y estéril.
- Esto reduce las posibilidades de enfermedades de las plantas y la propagación de la infección.
- Las plántulas no se estiran ni se marchitan durante la formación de la raíz.
- Las plántulas se eliminan remueven fácilmente para trasplantar sin shock de trasplante.
- El crecimiento de las plántulas se acelera, lo que conduce a un aumento de los ciclos de cultivo y, por lo tanto, a una mayor producción anual.

Para Weathers y Zobel (1992), la aeroponía se define como *el cultivo de plantas y/o tejidos enteros con sus raíces o todo el tejido alimentado por una niebla de aire/agua* (*en oposición a la inmersión en agua, suelo, agar nutritivo u otros sustratos*). Para ellos, las plantas que se cultivan solo parcialmente

con sus raíces en el aire y parte en soluciones nutritivas o se cultivan durante parte del tiempo en aire y parte del tiempo en solución nutritiva se cultivan a través de un proceso de aero-hidroponía y no de areoponía.

Así, los sistemas aeropónicos funcionan rociando o nebulizando el área de la zona de la raíz con solución nutritiva. Las raíces de las plantas se suspenden en el aire y se someten a una pulverización / nebulización continua o intermitente / periódica de gotas de agua ricas en nutrientes, en forma de gotas o nieblas muy finas, con tamaños de gota de 5 a 50 µm (micras). Es habitual encontrar un kit "hobby / doméstico" con gotas de spray de 30–80 µm. Los atomizadores ultrasónicos o de niebla seca producen un tamaño de gota <5 µm, pero estos requieren aire comprimido y boquillas muy finas, o puede ser posible utilizar transductores ultrasónicos para producir estas nieblas.

En aeroponía, como con la hidroponía, el suministro de nutrientes se puede optimizar y en una comparación entre la hidroponía y la aeropónica, Hikosaka et al. (2014) señalan que no se encontraron diferencias entre el crecimiento y la calidad de la cosecha en lechuga usando niebla seca de aeroponía de niebla seca. Sin embargo, hubo un aumento significativo en las tasas de respiración de la raíz y las tasas de fotosíntesis de las hojas. También señalan que este sistema también usa menos agua y que puede ser más eficiente y más fácil de manejar que la hidroponía convencional (Hikosaka et al. 2014). En un documento de revisión sobre tecnologías modernas de cultivo de plantas en la agricultura en entornos controlados, Lakhiar et al. (2018) nota que la aeroponía "Se considera el mejor método de cultivo de plantas para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible".

12.2.2 Origen de la aeroponía

Richard J. Stoner II es considerado el padre de la aeroponía. La revisión de la NASA de la acuaponia (Clawson et al. 2000) señala que el origen de la acuaponia se debe principalmente al estudio de la morfología de las raíces, pero se origina en la naturaleza, ejp. con plantas, por ejemplo, orquídeas que crecen en áreas tropicales donde las nieblas ocurren naturalmente. Clawson y col. (2000) señalan el desarrollo de la aeroponía de B. T. Barker, que "logró cultivar manzanos con un aerosol", y F. W. Went, quien en 1957 cultivó tomates y plantas de café en nieblas y denominó el proceso "aeroponía". Con respecto al estudio de la morfología de las raíces, Carter en 1942 utilizó la aeroponía como una forma de investigar las raíces de piña, y Klotz en 1944 investigó las raíces del aguacate y los cítricos, y luego muchos otros, incluidos Hubick y Robertson; Barak, Soffer y Burger; Yurgalevitch y Janes; y Dutoit, Weathers y Briggs llevaron a cabo varios

experimentos en aeroponía (consulte Clawson et al. 2000 para más detalles).

12.2.3 Problemas crecientes de aeropia

Clawson y col. (2000) informan las pruebas de Tibbits et al. (1994) que la nebulización continua puede 'contribuir al crecimiento de hongos y bacterias en la vecindad o en las plantas' y, además, algunos investigadores han descubierto que, debido a las gotitas finas y a los sistemas de nebulización continua, puede haber dificultades 'para suministrar nutrientes a todas las plantas donde hay una alta densidad de plantas '. A estel respecto, se ha demostrado que la nebulización a intervalos proporciona un sistema más saludable y raíces mas saludables en comparación con las técnicas de empañamiento continuo e hidropónico.

El uso de intervalos también hace que las plantas sean más resistentes a cualquier interrupción en la nebulización, condicionando las plantas para que prosperen más tiempo con niveles de humedad más bajos, con una probable reducción en los niveles de patógenos. Para una nebulización efectiva, el tamaño y la velocidad de la gota también son parámetros aeropónicos importantes. La eficiencia de la recolección de neblina de la raíz depende de su tamaño de filamento, tamaño de gota y velocidad " (Clawson et al. 2000).

12.2.4 Combinando acuaponia y aeroponia

Si bien varios empresarios y aficionados entusiastas están promoviendo la combinación de acuaponia con aeroponía, hay una serie de problemas que deben resolverse si se considera esta tecnología combinada para la agricultura futura. Un problema que debe resolverse es el nombre de este sistema, y aquí se sugiere que llamemos a este sistema combinado "acuaeroponicos".

Si bien hay numerosos videos e hilos de discusión en la web, sobre la combinación de aeroponía y acuaponia, el campo carece de literatura científica. Las discusiones basadas en la web plantean los problemas de obstrucción de los rociadores de neblina y la necesidad de filtrar las soluciones de acuaponía. Otro problema con los acuaeroponicos es el potencial de crecimiento de patógenos en el ambiente húmedo y aireado y se requerirá investigación para determinar esto. Una solución para resolver el problema de los nebulizadores es usar vibración ultrasónica para crear las nieblas, pero esto no resuelve ningún problema que pueda haber con el crecimiento de patógenos.

12.3 ALGAPONIA

12.3.1 Antecedentes

Las microalgas son fotoautótrofos unicelulares (que van desde 0.2 µm hasta 100 µm) y se clasifican en varios grupos taxonómicos. Las microalgas se pueden encontrar en la mayoría de los ambientes, pero se encuentran principalmente en ambientes acuáticos. El fitoplancton es responsable de más del 45% de la producción primaria mundial y de generar más del 50% del O2 atmosférico. En general, no existe una diferencia importante en la fotosíntesis de microalgas y plantas superiores (Deppeler et al. 2018). Sin embargo, debido a su tamaño más pequeño y la reducción en una serie de órganos fisiológicos internamente competitivos, las microalgas pueden crecer mucho más rápido que las plantas superiores (Moheimani et al. 2015). Las microalgas también pueden crecer en condiciones limitadas de nutrientes y tienen la capacidad de adaptarse a una gama más amplia de condiciones ambientales (Gordon y Polle 2007). Lo más importante es que el cultivo de microalgas no compite con la producción de cultivos alimentarios con respecto a las tierras cultivables y el agua dulce (Moheimani et al. 2015). Además, las microalgas pueden utilizar eficientemente nutrientes inorgánicos de los efluentes residuales (Ayre et al. 2017). En general, la biomasa de microalgas contiene hasta 50% de carbono, lo que las convierte en un candidato perfecto para bioremediar CO2 atmosférico (Moheimani et al. 2012). El aumento de la agricultura y la ganadería en todo el mundo ha dado lugar a aumentos significativos en el nitrógeno y el fósforo biológicamente disponibles que ingresan a la biosfera terrestre (Galloway et al. 2004).

Los sistemas de cultivo, cultivos de animales y alcantarillado de cultivos y animales contribuyen con cantidades significativas a estas cargas de nutrientes (Schoumans et al. 2014). La infiltración de estos nutrientes en las corrientes de agua puede causar problemas ambientales masivos, como floraciones de algas nocivas y mortalidad masiva de peces. Por ejemplo, en los Estados Unidos, la contaminación por nutrientes de la agricultura es reconocida como una de las principales fuentes de eutrofización (Sharpley et al. 2008). Controlar el flujo de nutrientes de las operaciones agrícolas en el entorno circundante resulta en desafíos técnicos y económicos que deben superarse para reducir tales efectos. Se han desarrollado varios procesos exitosos para tratar el efluente de desechos con altas cargas orgánicas.

Sin embargo, casi todos estos métodos no son muy efectivos para eliminar elementos inorgánicos del agua. Además, algunos de estos métodos son

bastante caros de operar. Un método simple para tratar los desechos orgánicos es la digestión anaeróbica (EAD). El proceso AD se entiende bien y, cuando se opera de manera eficiente, puede convertir más del 90% de las materias orgánicas de las aguas residuales en biometano y CO2 (Parkin y Owen 1986). El metano se puede usar para generar electricidad y el calor generado se puede usar para varios propósitos adicionales. Sin embargo, el proceso de AD provoca la creación de un efluente de digestión anaeróbica (ADE) que es muy rico en fosfato inorgánico y nitrógeno, así como una alta DQO (demanda de oxígeno de carbono). En ciertos lugares, este efluente puede tratarse con microalgas y macroalgas (Ayre et al. 2017).

12.3.2 Sistemas de crecimiento de algas.

Como el comité de las Naciones Unidas recomendó que los cultivos agrícolas convencionales se complementen con alimentos ricos en proteínas de origen no convencional, las microalgas se han convertido en candidatos naturales (Richmond y Becker 1986). El primer cultivo de microalgas se logró, aunque en 1890 cultivando *Chlorella vulgaris* (Borowitzka 1999). Debido al hecho de que las microalgas normalmente se dividen en un momento determinado del día, el término ciclostato se desarrolló para introducir un ciclo claro / oscuro (circadiano) en el cultivo (Chisholm y Brand 1981). El cultivo a gran escala de microalgas y el uso parcial de su biomasa, especialmente como base para ciertos productos como los lípidos, probablemente se inició seriamente ya en 1953 con el objetivo de producir alimentos a partir de un cultivo a gran escala de *Chlorella* (Borowitzka 1999). Típicamente, las algas se pueden cultivar en líquido usando estanques abiertos (Borowitzka y Moheimani 2013), fotobiorreactores cerrados (Moheimani et al. 2011), o una combinación de estos sistemas. Las algas también se pueden cultivar como biopelículas (Wijihastuti et al. 2017).

Fotobiorreactores cerrados (después de Moheimani et al. 2011): los cultivos cerrados de algas (fotobiorreactor) no están expuestos a la atmósfera, sino que están cubiertos con un material transparente o contenidos dentro de un tubo transparente. Los fotobiorreactores tienen la clara ventaja de prevenir la evaporación. Los fotobiorreactores cerrados y semicerrados se utilizan principalmente para producir productos de algas de alto valor. Debido al costo total del gasto operativo (OPEX) y el gasto de capital (CAPEX), los fotobiorreactores cerrados son menos económicos que los sistemas abiertos. Por otro lado, hay menos contaminación y menos pérdidas de CO_2, y al crear condiciones de cultivo reproducibles y flexibilidad en el diseño técnico, esto los convierte en un buen sustituto de los estanques abiertos. Algunas de las debilidades de los sistemas cerrados

pueden superarse (a) reduciendo la trayectoria de la luz, (b) resolviendo la complejidad del cizallamiento (turbulencia), reduciendo la concentración de oxígeno, y (c) un sistema de control de temperatura. Los fotobiorreactores cerrados se dividen principalmente en (a) carbohidratos bombonas, (b) tubulares, (c) puente aéreo y (d) fotobiorreactores de placa.

Estanques abiertos (según Borowitzka y Moheimani 2013): Los estanques abiertos son los más comúnmente utilizados para el cultivo de microalgas al aire libre a gran escala. La mayor producción comercial de algas se basa en canales abiertos (raceways) que son menos costosos, más fáciles para construir y operar en comparación con los fotobiorreactores cerrados. Además, el crecimiento de las microalgas encuentra menos dificultades en los sistemas de cultivo abiertos que en los cerrados. Sin embargo, solo unas pocas especies de microalgas (por ejemplo, *Dunaliella salina, Spirulina sp., Chlorella sp.*) se han cultivado con éxito en estanques abiertos. Los costos de producción comerciales de microalgas son altos, aproximadamente entre 4 y 20 $US/g-1. El cultivo comercial de microalgas en estanques abiertos al aire libre a gran estala se ha desarrollado en los últimos 70 años, y tanto los estanques inmóviles (sin remover) como los agitados se han desarrollado y han sido utilizados sobre una base comercial. Los grandes estanques abiertos sin agitar son simplemente construidos a partir de estanques de agua natural con lechos abiertos que generalmente tienen menos de 0,5 m de profundidad. En algunos estanques más pequeños, la superficie puede estar cubierta con láminas de revestimiento de plástico.

Los estanques abiertos sin agitación representan el más económico y menos técnico de todos los métodos de cultivo comerciales y se han utilizado comercialmente para producción de β-caroteno de *Dunaliella salina* en Australia. Dichos estanques se limitan principalmente al cultivo de microalgas que son capaces de sobrevivir en malas condiciones o tienen una ventaja competitiva que les permite superar contaminantes tales como protozoos, microalgas no deseadas, virus y bacterias. Los estanques agitados, por otro lado, tienen la ventaja de un régimen de mezcla. La mayoría de los estanques agitados son (a) estanques circulares con agitadores giratorios o (b) estanques de canalización simples o unidos.

Los estanques de cultivo circular se han utilizado principalmente para el cultivo a gran escala de microalgas, especialmente en el sudeste asiático. Los estanques circulares de hasta 45 m de diámetro y generalmente de 0.3–0.7 m de profundidad están descubiertos, pero hay algunos ejemplos que están cubiertos por cúpulas de vidrio. Los bajos esfuerzos de corte que se requieren para la producción de microalgas se producen en estos

sistemas, particularmente en el centro del estanque, y esta es una clara ventaja de este tipo de sistemas. Algunas desventajas incluyen costosas estructuras de concreto, uso ineficaz del suelo con grandes huellas, dificultades para controlar el movimiento del dispositivo agitador y el costo adicional en el suministro de CO_2. Las pistas de rodadura canalizaciones impulsadas por ruedas de paletas son el sistema comercial de cultivo de microalgas más común. Las canalizaciones pistas de rodadura generalmente se construyen en un solo canal o como canales vinculados. Las canalizaciones pistas de rodadura son generalmente poco profundas (0,15 a 0,25 m de profundidad), se construyen en forma de bucle y normalmente cubren un área de aproximadamente 0,5 a 1,5 ha.

Las canalizaciones pistas de rodadura se utilizan principalmente y se recomiendan para el cultivo comercial principal de tres especies de microalgas, incluidas *Chlorella, Spirulina y Dunaliella.* Las principales desventajas de estos sistemas abiertos son un alto riesgo de contaminación y una baja productividad, como resultado principalmente de los malos regímenes de mezcla y la penetración de la luz. En las canalizaciones pistas de rodadura, se ha demostrado que las concentraciones de biomasa de hasta 1000 mg de peso seco.L-1 y las productividades de 20 g de peso seco.m-2.d-1 son posibles.

El precio de la producción de microalgas hace que el logro económico sea altamente dependiente de la comercialización de productos caros y exclusivos, para los cuales la demanda está naturalmente restringida. Las canalizaciones pistas de rodadura también son el sistema de cultivo más utilizado para el tratamiento de aguas residuales (Parks and Craggs 2010).

Cultivo sólido (después de Wijihastuti et al.2017): un método alternativo de cultivo de microalgas es inmovilizar las células en una matriz polimérica o unirlas a la superficie de un soporte sólido (biopelícula). En general, el rendimiento de biomasa de tales cultivos de biomasa es al menos un 99% más concentrado que los cultivos a base de líquido. El desagüe es una de las partes más caras y de mayor consumo energético de cualquier producción masiva de algas. La principal ventaja del crecimiento de biopelículas es el potencial de reducir el proceso de deshidratación y el consumo de energía relacionado y, por lo tanto, los costos. El cultivo de biopelículas también puede aumentar la captura de luz celular, reducir el estrés ambiental (por ejemplo, pH, salinidad, toxicidad de metales, irradiación muy alta), reducir el costo de producción y el consumo de nutrientes. Los métodos de cultivo basados en sólidos se pueden usar para tratar las aguas residuales (eliminación de nutrientes y metales). Existen tres métodos principales para el cultivo de biopelículas: (a) 100% directamente sumergido en medio, (b)

parcialmente sumergido en medio y (c) utilizando un sustrato poroso para suministrar los nutrientes y la humedad del medio a las células.

12.3.3 Requisitos de nutrientes para el crecimiento de algas

Varios factores inhibidores físicos, químicos y biológicos pueden inhibir la alta producción de microalgas. Estos se describen en la Tabla 12.1. Un conocimiento básico de las limitaciones críticas de crecimiento es probablemente el factor más esencial antes de aplicar cualquier microalga a cualquier proceso. La luz es, con por mucho, el factor limitante más importante que afecta el crecimiento de cualquier alga. La temperatura también es un factor crítico para la producción masiva de algas (Moheimani y Parlevliet 2013). Sin embargo, estas variables son difíciles de controlar (Moheimani y Parlevliet 2013). Además de la luz y la temperatura, los nutrientes son el factor limitante más importante que afecta el crecimiento de cualquier alga (Moheimani y Borowitzka 2007) y cada especie de microalgas tiende a tener sus propios requerimientos óptimos de nutrientes. Los nutrientes más importantes son nitrógeno, fósforo y carbono (Oswald 1988).

La mayoría de las algas responden a la limitación de N aumentando su contenido de lípidos (Moheimani 2016). Por ejemplo, Shifrin y Chisholm (1981) informaron que en 20 a 30 especies de microalgas que examinaron, las algas aumentaron su contenido de lípidos bajo la privación de N. El fósforo también es un nutriente importante requerido para el crecimiento de microalgas, ya que juega un papel esencial en el metabolismo y la regulación celular, ya que participa en la producción de enzimas, fosfolípidos y compuestos que aportan energía (Smith 1983). Los estudios de Brown y Button (1979) sobre algas verdes *Selenastrum capricornutum* mostraron una aparente limitación de crecimiento cuando la concentración de fosfato en el medio era inferior a 10 nM. El CO2 también es un nutriente crítico

Tabla 12.1 Límites al crecimiento y productividad de microalgas (Moheimani y Borowitzka 2007)

Factores abióticos	Luz (calidad, cantidad)
	Temperatura
	Concentración de nutrientes
	O_2
	Co_2 y pH
	Salinidad
	Tóxicos Químicos
Factores bióticos	Patógenos (bacterias, Hongos, virus)
	Competicias por otras algas
Factores operacionales	Corte producido por mezcla
	Tasa de dilución
	Profundidad
	Frecuencia de Cosecha
	Adición de bicarbonato

para lograr una alta productividad de algas (Moheimani 2016). Por ejemplo, si no se agrega CO_2 adicional al cultivo de algas, la productividad promedio puede reducirse hasta en un 80% (Moheimani 2016). Sin embargo, la adición de CO_2 a los estanques de algas es bastante costosa (Moheimani 2016). La forma más económica de introducir CO_2 a un medio de cultivo es la transferencia directa del gas al medio burbujeando a través de piedras porosas sinterizadas o usando tuberías debajo de láminas de plástico sumergidas como inyectores de CO_2 (Moheimani 2016). Desafortunadamente, en todos estos métodos todavía hay una alta pérdida de CO_2 a la atmósfera debido al corto tiempo de retención de las burbujas de gas en la suspensión de algas.

Aunque agregar N, P y C es crítico, otros nutrientes también afectan el crecimiento y el metabolismo de las microalgas. También se sabe que la falta de otros nutrientes, como el manganeso (Mn) y varios otros cationes (Mg^{2+}, K^{+} y Ca^{2+}) reducen el crecimiento de algas (Droop 1973). Los oligoelementos también son críticos para el crecimiento de microalgas y algunas microalgas también requieren vitaminas para su crecimiento (Croft et al. 2005). Una forma efectiva y económica de suministrar nutrientes es combinando el cultivo de algas y el tratamiento de aguas residuales, que se analiza a continuación.

12.3.4 Tratamiento de algas y aguas residuales.

Con un aumento en el deterioro ambiental y una mayor necesidad de generar fuentes alternativas de alimentos y energía, existe el ímpetu para explorar la viabilidad de los tratamientos biológicos de aguas residuales junto con la recuperación de recursos. Los tratamientos de aguas residuales con microalgas han sido particularmente atractivos, debido a las actividades fotosintéticas de algas, donde la luz se transfiere a la biomasa rentable. Bajo ciertas condiciones, la biomasa de microalgas cultivadas en aguas residuales puede ser equivalente o superior en la producción de biomasa a especies de plantas superiores. Por lo tanto, el proceso puede transformar un producto de desecho en productos útiles (por ejemplo, alimentos para animales, alimentos para acuicultura, biofertilizantes y bioenergía). Por lo tanto, el efluente residual ya no es un producto residual negativo, sino que se convierte en un sustrato valioso para la producción de sustancias importantes y se ha informado sobre la bioremediación exitosa de aguas residuales microalgales durante más de medio siglo (Oswald y Gotass 1957; Delrue et al. 2016). La fitorremediación de algas de hecho proporciona una solución ambientalmente favorable para el tratamiento de aguas residuales, ya que puede utilizar nutrientes orgánicos e inorgánicos de manera eficiente (Nwoba et al. 2017). Los cultivos de

microalgas tienen un enorme potencial para los pasos posteriores del tratamiento de aguas residuales, especialmente para reducir 'N', 'P' y 'DQO' (Nwoba et al. 2016). Además, la capacidad adicional de las microalgas para crecer a través de diferentes condiciones nutricionales, como las condiciones fotoautotróficas, mixotróficas y heterotróficas, también mejora sus capacidades para eliminar varios tipos diferentes de contaminantes y productos químicos de las matrices acuosas. La capacidad de las microalgas para secuestrar carbono (CO2) permite la biorremediación de CO2. La relación sincronizada establecida de algas y bacterias establecida también es idealmente sinérgica para la bioremediación de aguas residuales (Muñoz y Guieysse 2006). A través de la fotosíntesis, las microalgas proporcionan el oxígeno requerido por las bacterias aeróbicas para la mineralización de materia orgániza así como la oxidación de NH4+ 4 (Muñoz y Guieysse 2006).

A cambio, las bacterias suministran dióxido de carbono para el crecimiento de microalgas, reduciendo significativamente la cantidad de oxígeno requerida para el proceso general de tratamiento de aguas residuales (Delrue et al. 2016). En general, los efluentes residuales con relaciones bajas de carbono a nitrógeno son fundamentalmente adecuados para el crecimiento de organismos fotosintéticos.

Lo más importante es que los tratamientos de microalgas para aguas residuales domésticas y agrícolas son una opción atractiva ya que la tecnología es relativamente fácil y requieren muy poca energía en comparación con el estándar de tratamiento efluente. La optimización del tratamiento de aguas residuales con microalgas en estanques de alcantarilla vertimiento a gran escala es atractiva, ya que combina el tratamiento eficaz de un producto de desecho nocivo y la producción de biomasa de algas rica en proteínas potencialmente valiosa. La Figura 12.1 resume un sistema de circuito cerrado para tratar cualquier desecho orgánico mediante la combinación de digestión anaerobia y cultivo de algas.

12.3.5 Algas y acuaponía

Las microalgas en la acuicultura y en los sistemas de acuaponía se ven con mayor frecuencia como una molestia, ya que pueden restringir los flujos de agua al obstruir las tuberías, consumir oxígeno, puede atraer insectos, reducir la calidad del agua y al descomponerse puede agotar el oxígeno. Sin embargo, un experimento de Addy et al. (2017) muestra que las algas pueden mejorar la calidad del agua en un sistema acuaponico, ayudar a controlar las caídas de pH relacionadas con el proceso de nitrificación, generar oxígeno disuelto en el sistema, "producir ácidos grasos poliinsatu-

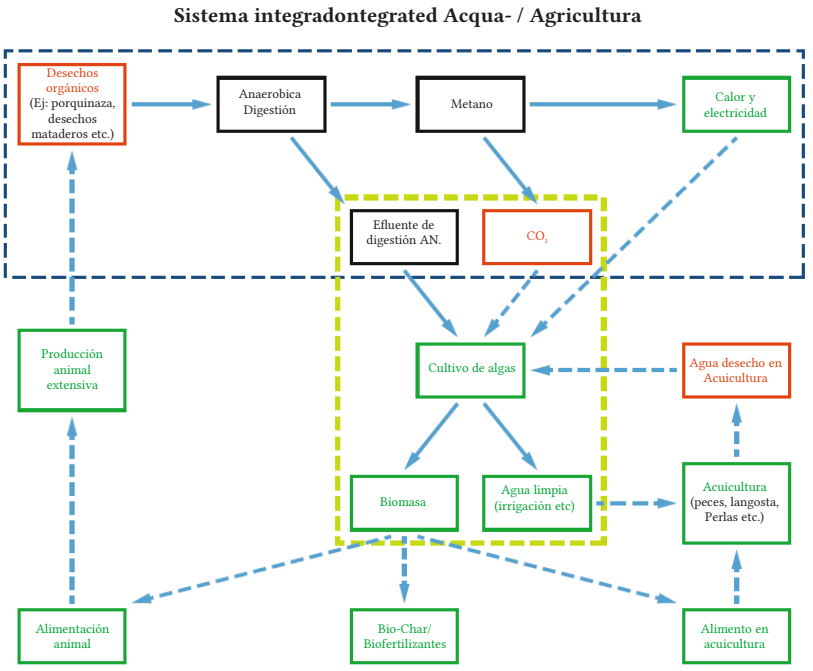


Fig. 12.1 Sistema de proceso integrado para utilizar el cultivo de algas para el tratamiento de residuos orgánicos y usuarios finales potenciales. (El proceso está diseñado en base a información de Ayre et al. 2017 y Moheimani et al. 2018)

rados como alimento de valor agregado para peces, y agregar diversidad y mejorar la resiliencia al sistema" "Uno de los 'santos griales' de la acuaponía es producir al menos parte de los alimentos que se alimentan a los peces como parte del sistema y es aquí donde se requiere investigación para producir algas que puedan cultivarse con parte del agua de acuaponía, muy probablemente en un ciclo separado, que luego se puede alimentar como parte de la dieta al pescado.

12.4 MARAPONIA Y HALOPONICA

Aunque la acuaponía de agua dulce es la técnica acuapónica más ampliamente descrita y practicada, los recursos de agua dulce para la producción de alimentos (agricultura y acuicultura) son cada vez más limitados y la salinidad del suelo aumenta progresivamente en muchas partes del mundo (Turcios y Papenbrock 2014). Esto ha llevado a un mayor interés y/o movimiento hacia fuentes de agua alternativas (por ejemplo, agua salobre a agua altamente salina, asi como agua de mar) y el uso de euriyhalinose o peces de agua salada, plantas halófitas, algas y glucófitos con baja

tolerancia a la sal (Joesting et al. 2016). Es interesante observar que si bien la cantidad de solución salina en el agua subterránea solo se estima en 0.93% de los recursos hídricos totales del mundo en 12,870,000 km^3, esto es más que las reservas subterráneas de agua dulce (10,530,000 km^3) que representan el 30,1% de todas las reservas de agua dulce (Appelbaum y Kotzen 2016).

El uso de agua salina en acuaponía es un desarrollo relativamente nuevo y, como ocurre con la mayoría de los nuevos desarrollos, los términos utilizados para describir el rango/jerarquía de los tipos deben establecerse sobre una base firme. En su corta historia, el término maraponía (es decir, acuaponía marina) se ha acuñado para acuaponía de agua de mar (SA), en otras palabras, sistemas que usan agua de mar y agua salobre (Gunning et al. 2016). Estos sistemas se ubican principalmente en tierra, en ubicaciones costeras y en el caso de SA, cerca de una fuente de agua de mar. Pero hay peces y plantas que crecen y se pueden usar en unidades de acuaponía donde los niveles de salinidad del agua varían. Por lo tanto, aunque tiene sentido etimológico usar el término "maraponía" para acuaponía de agua de mar, tiene menos sentido llamar acuaponía de agua salobre utilizando este término. Por lo tanto, sugerimos que se debe agregar un nuevo término al léxico acuapónico y esto es "haloponía", que se deriva de la palabra en Latin *halo* que significa sal y se combina con el sufijo *pónia*. Por lo tanto, la maraponia es un sistema de acuicultura multitrófica integrada en tierra (IMTA) que combina la producción acuícola de peces marinos, crustáceos marinos, moluscos marinos, etc., con la producción hidropónica de plantas acuáticas marinas (por ejemplo, algas marinas y halófitos de agua de mar) utilizando fuerza oceánica de agua de mar (aproximadamente 35,000 ppm [35 g/L]). Sin embargo, los sistemas acuaponicos que utilizan agua salina por debajo de los niveles oceánicos en un rango de salinidades deben denominarse haloponía (agua ligeramente salina –1000 a 3000 ppm [1–3 g/L], moderadamente salina 3000–10,000 ppm [3–10 g/L] y alta salinidad 10,000–35,000 ppm [10–35 g/L]). Estos sistemas también son sistemas IMTA terrestres que combinan la producción acuícola con la producción hidropónica de plantas acuáticas, pero tanto los peces como las plantas están adaptados o crecen bien en lo que se puede denominar agua salobre.

Aunque el concepto de maraponía es muy nuevo, un interés en la maricultura integrada basada en algas terrestres comenzó a aparecer en la década de 1970, comenzando desde una escala de laboratorio y luego expandiéndose a pruebas de escala piloto al aire libre. En algunos de los primeros estudios experimentales, Langton et al. (1977) demostraron con éxito el crecimiento de las algas rojas, *Hypnea musciformis*, cultivadas en tanques

con efluente de cultivo de concha. Alternativamente, los cultivos que normalmente se clasificarían como glucófitos, como el tomate común (*Lycopersicon esculentum*), el tomate cherry (*Lycopersicon esculentum* var. Cerasiforme) y la albahaca (*Ocimum basilicum*), pueden alcanzar niveles de producción notablemente exitosos en hasta 4 g/L (4000 ppm) de salinidad y a menudo se les conoce con niveles bajos o moderados de tolerancia a la sal (no debe confundirse con halófitos verdaderos, que son resistentes a altas salinidades). Otros cultivos que son tolerantes a salinidades moderadas incluyen nabo, rábano, lechuga, batata, habas, maíz, repollo, espinacas, espárragos, remolacha, calabaza, brócoli y pepino (Kotzen y Appelbaum 2010; Appelbaum y Kotzen 2016). Por ejemplo, Dufault al. (2001) y Dufault y Korkmaz (2000) experimentaron con los desechos de camarones (materia fecal de camarones y alimento descompuesto) como fertilizante para la producción de brócoli (*Brassica oleracea italica*) y pimiento (*Capsicum annuum*), respectivamente. Aunque sus estudios no utilizaron técnicas maraponicas, involucraron plantas que comúnmente se cultivan utilizando técnicas de acuaponia (agua dulce). Por lo tanto, debido a sus niveles de tolerancia a la salinidad, estos cultivos tienen un enorme potencial como especies candidatas para la producción en sistemas haloponicos utilizando salinidades bajas a medias.

Recientemente, varios estudios han demostrado que los halófitos se pueden regar con éxito con aguas residuales acuícolas de sistemas marinos utilizando técnicas hidropónicas o como parte de un sistema de recirculación acuícola (RAS). Waller y col. (2015) demostraron la viabilidad del reciclaje de nutrientes de un RAS de agua salada (salinidad 16 psu [16,000 ppm]) para la lubina europea (D. labrax) a través de la producción hidropónica de tres plantas halófitas: *Tripolium pannonicum* (aster marino), *Plantago coronopus* (plátano con cuerno de ciervo) y *Salicornia dolichostachya* (mosto de vidrio largo).

La mayor parte del trabajo maraponico realizado hasta ahora implica la integración de dos niveles tróficos: plantas/algas y peces. Sin embargo, un ejemplo de un sistema que incorpora más de dos niveles tróficos se puede ver en un experimento realizado por Neori et al. (2000), quienes diseñaron un pequeño sistema para el cultivo intensivo en tierra del abulón japonés (*Haliotis discus hannai*), algas marinas (*Ulva lactuca* y *Gracilaria conferta*) y dorada alimentada con pellets (*Sparus aurata*). Este sistema consistía en agua de mar sin filtrar (2400 L/día) bombeada a dos tanques de abulón y drenada a través de un tanque de peces y finalmente a través de una unidad de filtración/producción de algas marinas antes de ser descargada de regreso al mar. Los moluscos de alimentación por filtro también podrían usarse en dicho sistema. Kotzen y Appelbaum (2010) y Appelbaum y

Kotzen (2016) compararon el crecimiento de vegetales comunes usando agua potable y agua moderadamente salina (4187-6813 ppm) y encontraron que la albahaca (*Ocimum basilicum*) apio (*Apium graveolens*), puerros (*Allium ampeloprasum porrum*), lechuga (*Lactuca sativa* - varios tipos), acelgas (*Beta vulgaris.* '*cicla*'), cebolletas (*Allium cepa*) y berros (*Nasturtium officinale*) tuvieron un rendimiento extremadamente bueno.

Los maraponicos (SAs) y haloponicos ofrecen una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales de producción de cultivos y peces. Debido a que usan agua salina (marina a salobre), existe una dependencia reducida del agua dulce, que en algunas partes del mundo se ha convertido en un recurso muy limitado. Por lo general, se practica en un ambiente controlado (por ejemplo, un invernadero; tanques de flujo controlado) que brindan mejores oportunidades para la producción intensiva. Muchos sistemas de maraponía y haloponía son RAS cerrados con biofiltros orgánicos y/o mecánicos y, posteriormente, la reutilización del agua es alta, la contaminación de las aguas residuales se reduce o elimina enormemente, y los contaminantes se eliminan o tratan. Incluso los sistemas que no son RAS pueden reducir significativamente el exceso de nutrientes en las aguas residuales antes de la descarga. Además, la aparición de contaminantes en los sistemas de maraponía y haloponía no RAS puede reducirse o eliminarse mediante el uso de agua que contenga niveles bajos de contaminantes naturales y el uso de alimentos acuícolas alternativos que no contengan dioxinas o PCD (por ejemplo, nuevas alimentaciones hechas de macroalgas). Esta mejora en la calidad del agua reduce la potencial aparición de enfermedades y, por lo tanto, la necesidad de uso de antibióticos se reduce enormemente. Debido a su configuración versátil y bajos requerimientos de agua, los maraponicos y los halopónicos se pueden implementar con éxito en una amplia variedad de entornos, desde zonas costeras fértiles hasta desiertos áridos (Kotzen y Appelbaum 2010), así como en asentamientos urbanos o periurbanos. Otro beneficio potencial es que muchas de las especies que son adecuadas para estos sistemas tienen un alto valor comercial. Por ejemplo, la lubina europea eurihalina (*Dicentrarchus labrax*) y la dorada (*Sparus aurata*) pueden alcanzar un precio de mercado de € 9/kg y € 6/kg, respectivamente. Además, los halófitos comestibles tienden a tener un precio de mercado alto, por ejemplo, los agretti de mar (*Salsola soda*) tienen un precio de mercado de 4 a 4,5 euros por kg y el samphire de pantano (*Salicornia europaea*) se vende a 18 €/kg en supermercados. La evidencia es por lo tanto convincente. La maraponía y la haloponia proporcionan un campo dinámico y de rápido crecimiento que tiene el potencial de proporcionar una serie de servicios a las comunidades, muchos de los cuales se exploran en otras partes de esta publicación.

12.5 ACUAPONIA VERTICAL

12.5.1 Introducción

Si bien la acuaponía puede verse como parte de una solución global para aumentar la producción de alimentos de formas más sostenibles y productivas y donde el cultivo de más alimentos en las zonas urbanas ahora se reconoce como parte de la solución a la seguridad alimentaria y una crisis alimentaria global (Konig et al. al. 2016), los sistemas acuaponicos pueden volverse más productivos y sostenibles adoptando tecnologías de cultivo alternativas y aprendiendo de tecnologías emergentes como la agricultura vertical y las paredes vivas (LWs) (Khandaker y Kotzen 2018). Además, al ser eficientes en el espacio, pueden integrarse mejor en las áreas urbanas.

En el mundo desarrollado, la mayoría de los sistemas de acuaponía se colocan en invernaderos para controlar la temperatura; En el norte de Europa y América del Norte, por ejemplo, las temperaturas de invierno son demasiado frías en invierno y en áreas mediterráneas como España, Italia, Portugal, Grecia e Israel, las temperaturas de verano son demasiado cálidas. Por supuesto, hay muchas ventajas adicionales en el cultivo de alimentos en invernaderos controlados, como la capacidad de regular la humedad relativa y controlar el movimiento del aire, poner en cuarentena a los peces y las plantas de enfermedades y plagas y, potencialmente, poder agregar CO2 para ayudar crecimiento de la planta. Sin embargo, el cultivo de productos en un invernadero puede aumentar los costos fácilmente a través de (a) los costos de capital del invernadero (una estimación amplia de $ 350/m2 Arnold 2017) y (b) infraestructura aliada como controles de microclima que incluyen sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación. Además de los costos iniciales de infraestructura, también están los costos específicos de producción de invernaderos que incluyen el suministro de energía/poder para calefacción y refrigeración, así como la iluminación.

La mayoría de los sistemas acuapónicos, como el sistema de la Universidad de la Isla Virgen (UVI) (Fig. 12.1), diseñado por el Dr. James Rakocy y sus colegas, cultivan mediante tanques horizontales o camas emulando patrones de cultivo arables tradicionales basados en tierra para producir vegetales (Khandaker y Kotzen 2018). En otras palabras, el sistema se basa en hileras/matrices horizontales de plantas generalmente elevadas a la altura de la cintura para que las tareas de manejo relacionadas con las plantas puedan llevarse a cabo fácilmente. Los desarrollos paralelos en las tecnologías de pared viva y agricultura vertical han surgido casi al mismo tiempo que la acuaponía ha evolucionado y se encuentran de manera

similar en la etapa de desarrollo adolescente. Del mismo modo que en la acuaponía, a medida que más personas se involucran, hay un aumento concomitante en los sistemas y el desarrollo tecnológico para aumentar la productividad y reducir los costos. El acoplamiento de los sistemas de crecimiento vertical (sistemas de cultivo vertical y paredes vivas) en lugar de camas horizontales a los tanques de pesca y filtración es potencialmente una forma clave de aumentar la productividad, ya que debería ser posible aumentar el número de vegetales cultivados en comparación con los números producidos en cama de acuaponía horizontal típica. Los sistemas de acuaponía UVI (Fig. 12.2) producen aproximadamente 32 plantas por metro cuadrado (Al-Hafedh et al. 2008), dependiendo de la especie y el cultivar que se cultiva, pero como señalan Khandaker y Kotzen (2018), aproximadamente 96 plantas pueden crecer por metro cuadrado "utilizando elementos consecutivos del sistema *Terapia Urbana*[1] LW que es más de tres veces la densidad en comparación con el sistema de cultivo horizontal UVI".

Una estimación conservadora debería al menos duplicar la cantidad máxima cultivada en camas horizontales a 64 plantas/m2. En un experimento con lechuga (*Lactuca sativa* L. cv. "Little Gem") utilizando lechos horizontales y columnas plantadas, plantadas a densidades similares, Touliatos et al. (2016) sugieren que el "Sistema de cultivo vertical (VFS) presenta una alternativa atractiva a los sistemas de crecimiento hidropónico horizontal (y) que se podrían lograr mayores aumentos en el rendimiento incorporando iluminación artificial en el VFS".

Sistemas de cultivo vertical (VFS)
antes de discutir los requisitos específicos para sistemas verticales, necesitamos discutir los tipos de sistemas que están disponibles. En VFS hay tres tipos genéricos principales (Fig. 12.3):

1. **Camas horizontales apiladas:** en lugar de tener solo una cama de cultivo horizontal, las camas se apilan como estantes en niveles. Esta disposición significa que, en un invernadero solo la cama superior se enfrentará a la luz natural directa y se debe proporcionar luz suplementaria en todos los niveles. Esto generalmente se proporciona directamente debajo de la cama de cultivo de arriba. En principio, esto podría significar que las camas de cultivo podrían apilarse tan alto como lo permita el invernadero, pero, por supuesto, cultivar cosas en altura significa una mayor dificultad en el manejo del sistema, incluida la siembra, el mantenimiento y la cosecha, que requieren elevadores de

[1]Terapia Urbana S.L. produces a felt pocket type of living wall in Seville, Spain.

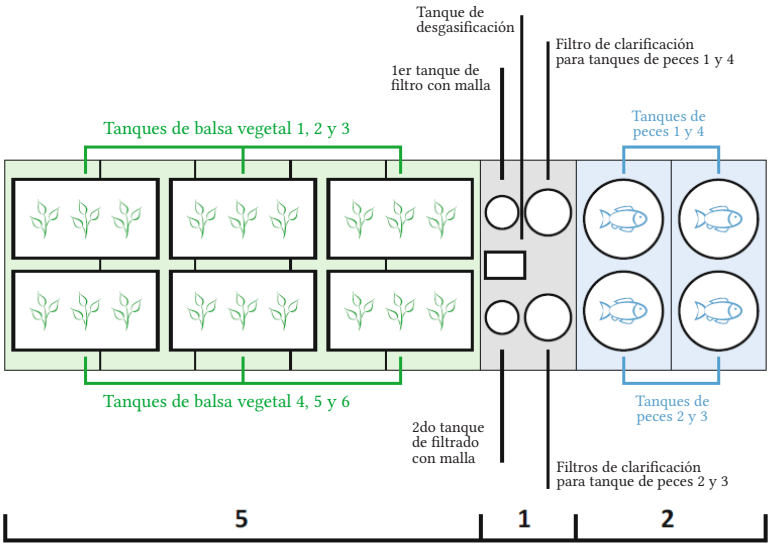


Fig. 12.2 Diagrama esquemático de un sistema UVI típico que ilustra la proporción de tanques de peces / filtros / tanques de cultivo de plantas que es 2:1:5. Esto muestra que el área más grande está subsumida por las plantas y es en esta área donde se puede considerar el ahorro de espacio. (Khandaker y Kotzen 2018)

tijera y energía adicional para bombear agua rica en nutrientes a todos los niveles. De acuerdo con Bright Agrotech (Storey 2015), hasta cuatro niveles son rentables y cualquier cosa por encima de eso no es rentable. Storey (2015) señala además que la mano de obra aumenta en un 25% en los niveles segundo, tercero y cuarto cuando se requiere un elevador de tijera (Fig. 12.3, Ilustración A).

2. Sistemas de torre vertical (VTS): los sistemas de torre vertical comprenden sistemas que cultivan plantas en forma vertical dentro de un contenedor o una serie de módulos apilados. Dependiendo del sistema, las plantas se cultivan orientadas en una dirección o si, por ejemplo, se plantan en forma de tubo, entonces se pueden colocar en cualquier dirección. Un ejemplo de un sistema de matriz vertical, donde las plantas se cultivan enfrentadas en una sola dirección es el ZipGrowTM que se cuelga o se apoya en filas (Fig. 12.3, Ilustración B1). Las filas intermedias son de aproximadamente 0,5 metros (20 pulgadas). El crecimiento de una manera más tridimensional ocurre con sistemas apilados o en sistemas tubulares que permiten que crezcan más plantas, pero la iluminación es más compleja (Fig. 12.3, Ilustración B2).

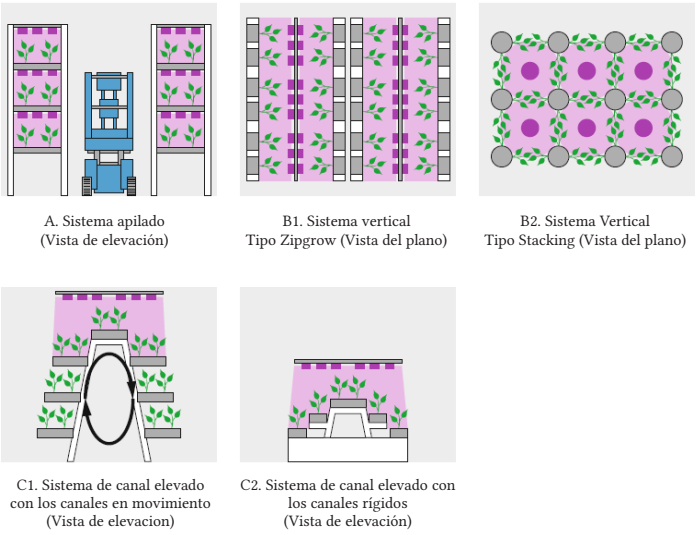


Fig. 12.3 Sistemas agrícolas verticales y sus disposiciones de iluminación.

3. Niveles escalonados: estos sistemas contienen canales de plantas rígidos o móviles. El Sky Greens VFS en Singapur utiliza un sistema de canal rotativo que mueve los canales hacia arriba y hacia la luz. La luz natural adicional es más significativa hacia la parte superior y menos hacia la parte inferior (Fig. 12.3, Ilustración C1). Se escalonan otros sistemas de niveles para que cada nivel tenga una interfaz sin obstáculos con la luz de arriba, ya sea luz natural del techo del invernadero o luz artificial. Pero estos sistemas tienen que ser bastante bajos para que las personas lleguen a las plantas (Fig. 12.3, Ilustración C2).

Paredes vivas

Las paredes vivas aún no se han utilizado en acuaponía, excepto en una serie de sistemas de prueba, como en la Universidad de Greenwich, Londres (Khandaker y Kotzen 2018). Mientras que la mayoría de los VFS usan canales de crecimiento de la técnica de película de nutrientes (NFT) o bloques de lana mineral encapsulados, los LW a veces también usan sustratos de tipo suelo en macetas o canales, que proporcionan medio de enraizamiento. Si bien esto es bueno para el cultivo de plantas ornamentales, así como verduras y hierbas, cuando se combina con tanques de peces, cualquier adición de tierra al sistema puede complicar el carácter microbiano del sistema y ser perjudicial para los peces. Sin embargo, esto es desconocido y requiere investigación. Los experimentos realizados en la Universidad de Greenwich (Khandaker y Kotzen 2018) indican que de una

serie de sustratos inertes individuales probados (incluyendo leca, perlita, paja, musgo de esfagno, lana mineral y fibra de coco), la fibra de coco y luego la lana mineral fueron superiores. en términos de penetración de la raíz y crecimiento de la raíz en lechuga (*Lactuca sativa*).

Vertical v. Horizontal: Factores a Considerar

Hay cuatro aspectos clave que deben tenerse en cuenta al comparar los beneficios (productividad y sostenibilidad) del crecimiento vertical, en comparación con el crecimiento horizontal. Estos son (1) espacio, (2) iluminación, (3) energía y (4) costos del ciclo de vida.

1. Espacio

Los beneficios de poder cultivar productos verticalmente, de forma consecutiva, deben equilibrarse con la cantidad de espacio que se requiere para proporcionar una distribución uniforme de la iluminación, así como el espacio de fila requerido para la gestión y el mantenimiento. El ancho de una fila en sistemas hidropónicos varía. Como se señaló, el sistema ZipGrowTM estándar mide aproximadamente 0.5 metros, mientras que el ancho de hilera habitual para el cultivo de tomates y pepinos varía hidropónicamente de 0.9 a 1.2 metros (Badgery-Parker y James 2010). El cultivo de plantas más pequeñas, como lechuga y hierbas como la albahaca, puede permitir filas más estrechas, pero, por supuesto, el ancho de fila debe garantizar que los productos no se vean comprometidos al mover elementos como carros y elevadores de tijera. Un problema clave con el crecimiento vertical es el conflicto que ocurre entre tener filas fijas y la iluminación fija, que debe ubicarse en las filas entre las fachadas de plantación. Estas luces impedirán los movimientos de las personas y, por lo tanto, las luces deben ser (i) parte de la estructura en crecimiento o (ii) retráctiles o móviles, para que los trabajadores puedan realizar tareas fácilmente, o (iii) las estructuras de plantación son móviles y las luces permanecer estático.

2. Iluminación

La producción de hortalizas y otras plantas en invernadero depende de arreglos espaciales específicos que permiten la siembra, el manejo a través del crecimiento y luego la cosecha. La disposición espacial dependerá de los tipos de plantas y los tipos de mecanización que se instalen. Además, el crecimiento eficiente depende del suplemento de luz adicional de diferentes tipos, que tienen sus propios pros y contras. En general, lo que hacen estas luces es proporcionar longitudes de onda específicas para el crecimiento de las plantas y para la producción de frutas o flores. Mientras que es relativamente simple y más común iluminar de manera uniforme las plantas cultivadas horizontalmente, es más difícil iluminar uniformemen-

te una superficie vertical.

Con respecto a los tipos de iluminación, muchos productores se han mudado o están tentados a instalar LED (diodos emisores de luz), debido a su larga vida útil, hasta 50,000 horas o más (Gupta 2017), sus bajos requisitos de energía y su reciente reducción en costo. Virsile y col. en Gupta (2017) señalan que *la mayoría de las aplicaciones de iluminación LED en invernaderos eligen las combinaciones de longitudes de onda roja y azul con alta eficiencia fotónica*, pero que la luz verde y blanca *contiene cantidades sustanciales de longitudes de onda verde tiene un impacto fisiológico positivo en las plantas.* Sin embargo, *la combinación de luces azules y rojas crea una imagen gris violácea*, y esto dificulta la evaluación visual de la salud de las plantas. El tipo de longitudes de onda elegidas es complejo y puede tener beneficios en diferentes etapas de la vida de la planta e incluso según los cultivares de, por ejemplo, la lechuga. Las lechugas de hojas rojas, por ejemplo, responden a la iluminación LED azul, aumentando su pigmentación (Virsile et al. En Gupta 2017). Además, la iluminación LED azul puede mejorar la calidad nutricional de las verduras verdes, reduciendo el contenido de nitrato, aumentando los antioxidantes y compuestos fenólicos y otros compuestos beneficiosos. Los espectros de luz también afectan el sabor, la forma y la textura (Virsile et al. En Gupta 2017). Los costos de los LED han disminuido significativamente y, a medida que la eficacia de los LED ha aumentado, el tiempo de retorno de la inversión ha disminuido (Bugbee en Gupta 2017).

Por supuesto, existe otra iluminación, que incluye iluminación fluorescente, iluminación de haluro metálico (MH) e iluminación de sodio a alta presión (HPS). El tipo de iluminación que se utiliza en la agricultura vertical y con paredes vivas varía considerablemente según la escala y la ubicación. Las lámparas fluorescentes compactas (CFLs) son relativamente delgadas y pueden caber fácilmente en espacios pequeños, pero requieren un balastro inductivo para regular la corriente a través de los tubos. Las CFLs usan solo el 20-30% de una bombilla incandescente y duran entre seis y ocho veces más, pero son casi un 50% menos eficientes que los LED. Son, con mucho, el más barato de los tres tipos principales de luces de cultivo. La tecnología de luz de crecimiento HPS tiene más de 75 años y está bien establecida para crecimientos bajo vidrio, pero producen mucho calor y, por lo tanto, no son adecuados para la agricultura vertical y las paredes vivas, donde la luz debe entregarse muy cerca de las plantas. El calor producido por las luces de crecimiento LED, por otro lado, es mínimo. Sin embargo, el costo es más alto que los otros dos tipos, y se necesita protección ocular para la exposición a largo plazo a los LED, ya que la exposición a largo plazo a los espectros de luz puede ser perjudicial para los ojos. La

disposición de las unidades VFS dictará la disposición de la iluminación, pero en general estas están iluminadas por LED. El método de iluminación de las paredes vivas dependerá de la altura de la pared. Cuanto más alta sea la pared, más difícil será aplicar una distribución uniforme en la superficie, aunque debe tenerse en cuenta que el número de luces utilizadas no debería ser diferente de las que se usan en las camas de cultivo horizontales y si la pared es alta, entonces las luces pueden necesitar ser escalonadas. Como la mayoría de las paredes vivas se ubican con fines estéticos, la iluminación debe mantenerse lo más lejos posible, fuera del camino y la iluminación no solo debe proporcionar la luz adecuada para el crecimiento y la salud de las plantas, sino también para que las plantas se vean bien (Fig 12.4).

Los avances en la tecnología LED, donde las frecuencias y la intensidad de la iluminación se pueden diseñar para adaptarse a especies y cultivares individuales, así como a sus diversos ciclos de vida, significan que los LED se convertirán en la tecnología elegida en el futuro cercano. Además, esto se verá reforzado por reducciones en los costos.

Fig. 12.4 A 4 metros de altura, la pared viva de 5 metros de largo se puede iluminar adecuadamente con seis lámparas de descarga de alta eficiencia. Tenga en cuenta que estos fueron elegidos no solo para proporcionar luz adecuada para el crecimiento pero también para que las plantas en la pared viva se vean bien. (Universidad de Greenwich Living Wall. Fuente: Benz Kotzen)

3. Energía
Es probable que se requiera más energía para la iluminación de VFS y LW, ya que incluso la iluminación natural no se puede lograr sobre superficies verticales. Además, se requerirá más potencia de bombeo para riego y esto será relativo a la altura del VFS o LW.

4. Análisis comparativo del ciclo de vida (LCA)
Si bien hay numerosos estudios realizados sobre el análisis del ciclo de vida de la acuaponía y varios aspectos de los sistemas acuaponicos, no hay estudios comparativos que comparen la acuaponía vertical versus la horizontal. Esto aún no se ha hecho. Estamos llegando a un punto en el que es probable que la acuaponía vertical amerite más pruebas e investigaciones y, con el tiempo, la acuaponía vertical, que combina los sistemas de cultivo vertical o los sistemas de paredes vivas con los tanques de peces y las unidades de filtración, es probable que se generalice, siempre que estos puedan ser rentables y sostenibles.

12.6 TECNOLOGÍA BIOFLOC (BFT) APLICADA PARA ACUAPONÍA

12.6.1 Introducción

La tecnología Biofloc (BFT) se considera la nueva 'revolución azul' en la acuicultura (Stokstad 2010) ya que los nutrientes se pueden reciclar y reutilizar continuamente en el medio de cultivo, beneficiado por la producción de microorganismos in situ y por el intercambio mínimo o cero de agua (Avnimelech 2015). Estos enfoques pueden enfrentar algunos desafíos serios en el sector, como la competencia por la tierra y el agua y los efluentes descargados al medio ambiente que contienen un exceso de materia orgánica, compuestos nitrogenados y otros metabolitos tóxicos. BFT fue desarrollado por primera vez a principios de la década de 1970 por el equipo de Aquacop en Ifremer-COP (Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar, Centro Oceánico del Pacífico) con diferentes especies de peneidos camaroneros, incluidos *Litopenaeus vannamei, L. stylirostris* y *Penaeus monodon* (Emerenciano et al. 2011). En el mismo período, Ralston Purina (una empresa privada de los EE.UU.) En conexión con Aquacop aplicó la tecnología tanto en Crystal River (EE.UU.) como en Tahití, lo que condujo a una mayor comprensión de los beneficios del biofloc para el cultivo de camarones. Varios otros estudios permitieron un enfoque integral de BFT e investigaron las interrelaciones entre el agua, los animales y las bacterias, comparando BFT con un "rumen externo" pero que ahora se aplica a los camarones. En la década de 1980 y a principios de

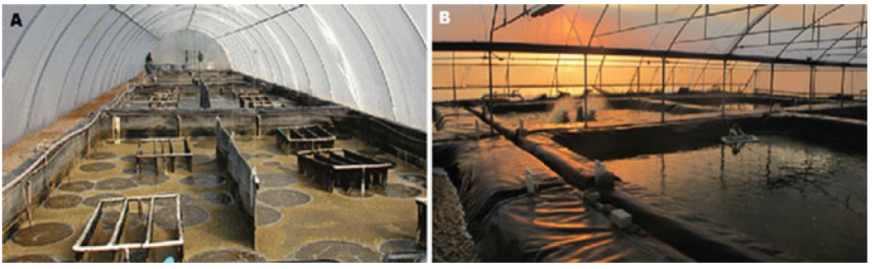


Fig. 12.5 Tecnología de biofloc (BFT) aplicada para el cultivo de camarones marinos en Brasil (a) y para el cultivo de tilapia en México (b) (Fuente: EMA-FURG, Brasil y Maurício G. C. Emerenciano)

la década de 1990, tanto Israel como los EE.UU. (Centro de Maricultura de Waddell) comenzaron la I + D en BFT con tilapia y camarones blancos del Pacífico *L. vannamei*, respectivamente, en los que las preocupaciones ambientales, la limitación del agua y los costos de la tierra fueron los principales agentes causales que promovieron la investigación (Emerenciano et al. 2013).

Las primeras operaciones comerciales de BFT y probablemente las más famosas comenzaron en la década de 1980 en la granja "Sopomer" en Tahití, Polinesia Francesa, y a principios de la década de 2000 en la granja de Acuicultura de Belice o "BAL", ubicada en Belice, América Central. Los rendimientos obtenidos con tanques de concreto de 1000 m2 y estanques de cultivo forrados de 1.6 ha fueron de aproximadamente 20–25 ton/ha/año con dos cultivos en Sopomer y 11–26 ton/ha/ciclo en BAL, respectivamente. Más recientemente, BFT se ha expandido con éxito en la cría de camarones a gran escala en Asia, América del Sur y Central, así como en invernaderos a pequeña escala en los Estados Unidos, Europa y otras áreas. Al menos en una fase (por ejemplo, fase de vivero) BFT se ha utilizado con gran éxito en México, Brasil, Ecuador y Perú. Para el cultivo de tilapia a escala comercial, las granjas en México, Colombia e Israel están utilizando BFT con producciones de alrededor de 7 a 30 kg/m3 (Avnimelech 2015) (Fig. 12.5b). Además, esta tecnología se ha utilizado (por ejemplo, en Brasil y Colombia) para producir juveniles de tilapia (~ 30 g) para el stock adicional en jaulas o estanques de tierra (Durigon et al. 2017). BFT se ha aplicado principalmente al cultivo de camarones y, en cierta medida, con tilapia. Se han probado otras especies y son prometedoras, como se observó para el pez gato plateado (*Rhamdia quelen*) (Poli et al., 2015), carpa (Zhao *et al.* 2014), piracanjuba (*Brycon orbignyanus*) (Sgnaulin et al., 2018) , cachama (*Colossoma macropomum*) (Poleo et al., 2011) y otras especies de crustáceos como *Macrobrachium rosenbergii* (Crab et al., 2010), *Farfantepenaeus brasiliensis* (Emerenciano et al., 2012), *F. paulensis* (Ballester et al. , 2010), *Penaeus semisulcatus* (Megahed, 2010), *L. stylirostris*

(Emerenciano et al., 2011) y *P. monodon* (Arnold et al., 2006). El interés en BFT es evidente por el creciente número de universidades y centros de investigación que realizan investigaciones particularmente en los campos clave de gestión de crecimiento, nutrición, reproducción, ecología microbiana, biotecnología y economía.

12.6.2 ¿Como funciona BFT?

Los microorganismos juegan un papel clave en los sistemas BFT (Martinez-Cordoba et al. 2015). El mantenimiento de la calidad del agua, principalmente mediante el control de la comunidad bacteriana sobre los microorganismos autótrofos, se logra utilizando una alta relación carbono/nitrógeno (C:N) dado que los subproductos nitrogenados pueden ser fácilmente absorbidos por bacterias heterotróficas. Al comienzo de los ciclos de cultivo, se requiere una alta relación carbono/nitrógeno para garantizar el crecimiento óptimo de bacterias heterotróficas, utilizando esta energía para su mantenimiento y crecimiento (Avnimelech 2015). Además, otros grupos de microorganismos son cruciales en los sistemas BFT. La comunidad bacteriana quimioautotrófica (es decir, las bacterias nitrificantes) se estabiliza después de aproximadamente 20-40 días y podría ser responsable de dos tercios de la asimilación de amoníaco en el sistema (Emerenciano et al. 2017). Por lo tanto, la adición de carbono externo debe reducirse y la alcalinidad consumida por los microorganismos debe reemplazarse por diferentes fuentes de carbonato/bicarbonato (Furtado et al. 2011). La estabilidad del intercambio de agua cero o mínimo depende de la interacción dinámica entre las comunidades de bacterias, microalgas, hongos, protozoos, nematodos, rotíferos, etc. que ocurrirán naturalmente (Martinez- Cordoba et al. 2017). Los agregados (bioflocs) son una fuente natural rica en proteínas y lípidos de alimentos que están disponibles las 24 h por día debido a una interacción compleja entre materia orgánica, sustrato físico y gran variedad de microorganismos (Kuhn y Boardman 2008; Ray et al. 2010). La productividad natural en forma de producción de microorganismos desempeña tres funciones principales en los tanques, canalizaciones o estanques revestidos:

(1) en el mantenimiento de la calidad del agua, por la absorción de compuestos de nitrógeno que generan proteínas microbianas *in situ*; (2) en nutrición, aumentando la viabilidad del cultivo al reducir las relaciones de conversión de alimento y una disminución en los costos de alimento; y (3) en competencia con patógenos (Emerenciano et al. 2013).

Con respecto a la calidad del agua para los organismos de cultivo, además del oxígeno, el exceso de materia orgánica en partículas y los compuestos

de nitrógeno tóxicos son la principal preocupación en los sistemas biológicos. En este contexto, existen tres vías para la eliminación de nitrógeno amoniacal: a menor velocidad (1) eliminación fotoautotrófica por algas y a mayor velocidad (2) conversión bacteriana heterotrófica de nitrógeno amoniacal directamente a biomasa microbiana y (3) conversión bacteriana autotrófica del amoniaco al nitrato (Martinez- Cordoba et al. 2015). El nitrato disponible en los sistemas más otros nutrientes menores y mayores acumulados durante el ciclo podrían usarse como sustrato para el crecimiento de las plantas en sistemas acuaponicos (Pinho et al. 2017).

12.6.3 BFT en Acuaponia

La aplicación de BFT en sistemas acuaponicos es relativamente nueva, aunque Rakocy (2012) menciona un proyecto comercial a escala piloto con tilapia. La Tabla 12.2 resume los estudios recientes clave que han usado BFT en sistemas acuaponicos. En general, los resultados demuestran que la tecnología biofloc puede usarse e integrarse en una producción de peces o camarones. El BFT en comparación con otros sistemas convencionales de acuicultura (como RAS) en realidad mejoró los rendimientos de plantas y peces y promovió una mejor calidad visual de la planta (Pinho et al. 2017), pero no en todos los casos (Rahman 2010; Pinho 2018). Pinho y col. (2017) observaron que los rendimientos de lechuga con el sistema BFT fueron mayores en comparación con el sistema de recirculación de agua clara (Fig. 12.6). Esto posiblemente se deba a la mayor disponibilidad de nutrientes proporcionada por la mayor actividad microbiana Sin embargo, esta tendencia no se observó en el estudio de Rahman (2010), que comparó el efluente del cultivo de peces en un sistema BFT con una solución hidropónica convencional en una producción de lechuga. Además, Pinho (2018) en un estudio reciente observó que el rendimiento productivo de la lechuga en el sistema de acuaponía que usa tilapia en una fase de vivero (1-30 g) fue influenciado negativamente por las aguas residuales biofloc en comparación con las aguas residuales RAS durante 46 días. La variación en los resultados identifica la necesidad de estudios adicionales en esta área. BFT se puede usar con agua de baja salinidad, pero con algunas variedades de lechuga (Lenz et al. 2017), y se pueden usar aguas de mayor salinidad, p.ej. con especies de plantas halófitas como *Sarcocornia ambigua* cocultivo con camarones blancos del Pacífico *Litopenaeus vannamei* (Pinheiro et al. 2017) (Fig. 12.7). El pez gato plateado *Rhamdia quelen*, también ha mostrado un buen potencial para la integración de acuaponía con BFT (Rocha et al. 2017).

Con BFT, la concentración de sólidos puede afectar severamente las raíces e impactar la absorción de nutrientes y la disponibilidad de oxígeno. Como

resultado, los rendimientos pueden verse afectados, pero también la calidad visual de las plantas (por ejemplo, lechugas), que es un criterio importante para los consumidores. Con esto en mente, el manejo de sólidos es un tema importante para futuros estudios donde se considera el impacto de los sólidos (fracción de partículas y también fracción disuelta) en los sistemas acuaponicos cuando se aplica BFT (Fig. 12.8). Además, se deben realizar estudios económicos para comparar los costos involucrados de los diversos sistemas de acuicultura y cultivo de plantas e identificar la idoneidad en relación con las diferentes ubicaciones y condiciones.

Tabla 12.2 Estudios recientes en todo el mundo que aplican la BFT en sistemas acuaponicos para diferentes especies acuáticas y vegetales

Especies acuáticas	Especies de plantas	Resultados principales	Referencias
Tilapia	Lechuga	La tecnología Biofloc no mejoró la producción de lechuga en comparación con la solución hidropónica convencional	Rahman (2010)
Tilapia	Lechuga	Se mejoró el rendimiento y la calidad visual de la lechuga usando BFT en comparación con el Sistema de recirculación de agua clara	Pinho et al. (2017)
Tilapia (Iniciacion)	Lechuga	El rendimiento de la planta (lechuga) usando tilapia en una fase de vivero (1-30g) fue influenciado negativamente por las aguas residuales biofloculares en comparación con las aguas residuales RAS después de dos ciclos de la planta (13 días cada uno). Los aspectos visuales de la planta fueron mejores en RAS en comparación con BFT	Pinho et al. (2018)
Tilapia	Lechuga	La presencia de elementos filtrantes (filtro mecánico y filtro biológico) afectó positivamente la producción de lechuga en sistemas acuaponicos en comparación con el tratamiento sin filtros usando BFT	Barbosa (2017)
Tilapia	Lechuga	La baja salinidad (3 ppt) se puede realizar en acuaponia con BFT. Los parámetros visuales y de rendimiento indicaron que la variedad púrpura tenía un mejor rendimiento que las variedades suaves y crujientes.	Lenz et al. (2017)
Pez gato plateado	Lechuga	El uso de bioflocs en el sistema acuapónico puede mejorar la productividad de la lechuga en un cultivo integrado con pez gato plateado.	Rocha et al. (2017)
Litopenaeus vannamei	*Sarcocornia ambigua*	El rendimiento del camarón marino *L. vannamei* no se vio afectado por la producción de acuaponía integrada por *S. ambigua* y tampoco mejoró el uso de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno) en el sistema de cultivo.	Pinheiro et al. (2017)

Fig. 12.6 Invernadero experimental de acuaponía que compara la tecnología biofloc y las aguas residuales RAS en la Universidad Estatal de Santa Catarina (UDESC), Brasil. (Fuente: Pinho et al. 2017).

Fig. 12.7 Producción de acuaponia halófica de alta Salinidad *Sarcocornia ambigua* integrada con Camarón Blanco del Pacifico *Litopenaeus vannemei* aplicando. Con éxito la tecnología biofloc en la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. (Fuente: LCM-UFSC, Brasil)

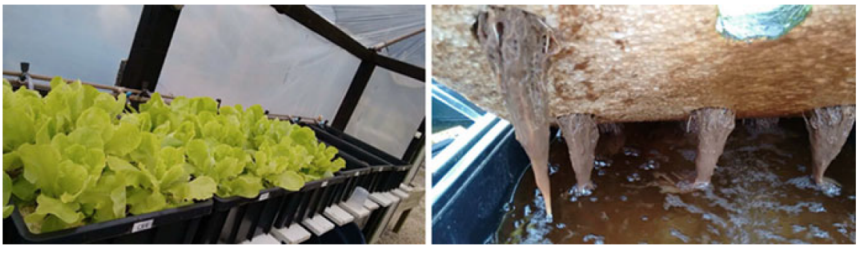


Fig. 12.8 Producción de lechuga acuaponica integrada con tilapia utilizando tecnología de biofloc (izquierda) y acumulación de sólidos en suspensión en las raíces de lechuga (derecha). Barbosa (2017).

12.7 DIGEPONICOS

El procesamiento anaeróbico de biomasa cultivada a propósito, así como el material vegetal residual de la actividad agrícola, para la producción de biogás es un método bien establecido. El digestato bacterianamente indigerible se devuelve a los campos como fertilizante y para construir humus. Si bien este proceso está muy extendido en la agricultura, la aplicación de esta tecnología en la horticultura es relativamente nueva. Stoknes y col. (2016) afirman que, dentro del proyecto "Alimentos para desperdiciar en alimentos" (F2W2F), se ha desarrollado por primera vez un método eficiente para

la utilización del digestato como sustrato y fertilizante. El equipo de investigación acuñó el término "digeponicos" para este sistema circular. Digeponicos, en contraste con la acuaponia, reemplaza la parte de la acuicultura con un digestor anaeróbico o, cuando se compara con un sistema acuaponico de tres lazos que incluye un anaerobico, la parte de la acuicultura se retira del sistema, dejando dos lazos principales, el asa de digestión y el ciclo hortícola. El aporte orgánico requerido que se proporciona en forma de alimento para peces a un sistema de acuaponía se reemplaza con desperdicio de alimentos provenientes de la producción humana de alimentos para la digestión.

La composición variable de nutrientes en la corriente de entrada en oposición a la corriente de nutrientes conocida, constante y probablemente nutricionalmente optimizada que resulta de la alimentación de peces probablemente requerirá un análisis de nutrientes y un régimen de manejo más estrictos que los requeridos en acuaponía.

El biogás producido, que contiene principalmente metano y dióxido de carbono, puede utilizarse dentro de las instalaciones para la producción de electricidad y calor. El gas de escape resultante, rico en dióxido de carbono, puede usarse como fertilizante directamente en el invernadero, reduciendo las emisiones en comparación con las plantas de biogás clásicas utilizadas en la agricultura.

Dado que el "digestato fresco y no tratado en suspensión líquida anaeróbica (contiene) sustancias tóxicas para plantas, una conductividad eléctrica (CE) y una demanda química de oxígeno (DQO) muy altas" (Stoknes et al. 2016), debe tratarse para que sea adecuado para la fertilización de plantas. Se han examinado varios métodos de moderación dentro del proyecto F2W2F. La EC relativamente alta del digestato y la flexibilidad operativa de un digestor alimentado con desperdicios de alimentos de bajo costo alivia algunos de los problemas de acoplamiento estrecho que a menudo se atribuyen a los sistemas acuaponicos acoplados (ver Cap. 7). Por lo tanto, la digeponia puede servir como una alternativa interesante a la acuaponia en situaciones donde la parte de la acuicultura representa un desafío. Con respecto a un sistema de acuaponia de tres circuitos que ya comprende un circuito con un digestor anaeróbico, la inclusión de un flujo de desperdicio de alimentos para el aporte orgánico podría representar una dirección futura interesante. El rendimiento de metano de los lodos de acuicultura es bastante limitado. Una inclusión específica de biomasa agrícola residual con el objetivo de optimizar el rendimiento de metano podría mejorar el rendimiento general.

12.8 VERMIPONICOS Y ACUAPONÍA

Sería negligente en este capítulo no mencionar las lombrices de tierra y su introducción en acuaponía, y así este capítulo concluye con un breve resumen de estos invertebrados detritívoros y sus capacidades para convertir los desechos orgánicos en fertilizantes. Se dice que los gusanos y la forma en que digieren la materia eran de interés para Aristóteles y Charles Darwin, así como para los filósofos Pascal y Thoreau (Adhikary 2012) y estaban protegidos por la ley bajo Cleopatra.

Las lombrices de tierra se valoran en la agricultura y la horticultura, ya que son "vitales para la salud del suelo porque transportan nutrientes y minerales desde abajo a la superficie a través de sus desechos, y sus túneles airean el suelo" (National Geographic).

La vermicultura moderna se atribuye a Mary Appelhof, quien a principios de los años setenta y ochenta produjo una serie de publicaciones sobre compostaje con gusanos. El vermicompostaje contemporáneo se produce a gran y pequeña escala con el objetivo de eliminar los desechos orgánicos y producir fertilizantes en forma de compost y "té de lombriz".

El té de gusano se puede producir al remojar los moldes de gusanos o al lixiviar los nutrientes del compost a través de la humectación o el lixiviado natural de la precipitación.

Vermiponicos utiliza los moldes de gusanos, principalmente gusanos rojos, también conocidos como gusanos tigre (*Eisenia fetida*) o (*E. foetida*) para proporcionar nutrientes en un sistema hidropónico. Cuando los gusanos se introducen en un sistema acuaponico, sugerimos que el sistema se denomine "vermi-acuaponia" para diferenciar los sistemas. Es, por lo tanto, la introducción de gusanos en los lechos de cultivo de las partes de la planta de un sistema acuaponico. Cabe señalar que la vermi-aquaponia está en su infancia y se practica principalmente por aficionados y en laboratorios de investigación. Los gusanos se introducen principalmente en los medios de cultivo de plantas, generalmente camas de grava, donde pueden ayudar a descomponer los desechos sólidos de los peces y cualquier detrito de las plantas y, además, proporcionar nutrientes adicionales para las plantas, y también pueden ser alimentados para peces carnívoros. En la mayoría de los casos, las camas son de tipo inundación y drenaje, de modo que los gusanos no están constantemente bajo el agua.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico-CNPq (Proyecto Número 455349/2012-6) y a la

Fundación de Investigación Científica y Tecnológica del Estado de Santa Catarina-FAPESC (Proyecto Número 2013TR3406 y 2015TR453).

REFERENCIAS

Addy MM, Kabir F, Zhang R, Lu Q, Deng X, Current D, Griffith R, Ma Y, Zhou W, Chen P, Ruan R (2017) Co-cultivation of microalgae in aquaponic systems. Bioresour Technol 245 (2017):27–34

Adhikary S (2012) Vermicompost, the story of organic gold: a review. Agricult Sci 3(7). https://doi. org/10.4236/as.2012.37110

Al-Hafedh YS, Alam A, Beltagi MS (2008) Food production and water conservation in a recirculating Aquaponic system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. J World Aquacult Soc 39(4):510–520

Appelbaum S, Kotzen B (2016) Further investigations of Aquaponics using brackish water resources of the Negev Desert. Ecocycles Scientific J Eur Ecocycl Soc 2(2):26–35. ISSN 2416-2140 https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.53

Arnold J (2017) Greenhouse business: start-up costs, profits and labor, 19 April 2017. https://blog. brightagrotech.com/author/jason-arnold

Arnold SJ, Sellars MJ, Crocos PJ, Coman GJ (2006) An evaluation of stocking density on the intensive production of juvenile brown tiger shrimp (Penaeus esculentus). Aquaculture 256 (1):174–179

Avnimelech Y (2015) Biofloc technology: a practical guide book, 3rd edn. The World Aquaculture Society, Baton Rouge

Ayre JM, Moheimani NR, Borowitzka MA (2017) Growth of microalgae on undiluted anaerobic digestate of piggery effluent with high ammonium concentrations. Algal Res 24:218–226

Badgery-Parker J, James L (2010) Commercial greenhouse cucumber production. NSW Agricul- ture, Orange

Ballester ELC, Abreu PC, Cavalli RO, Emerenciano M, De Abreu L, Wasielesky W Jr (2010) Effect of practical diets with different protein levels on the performance of Farfantepenaeus paulensis juveniles nursed in a zero exchange suspended microbial flocs intensive system. Aquac Nutr 16 (2):163–172

Barbosa M (2017) Biofloc technology: do filtering elements might affects lettuce aquaponics production integrated with tilapia? A thesis presented at animal science postgraduate program, Santa Catarina State University (Degree of Master of Science), Chapecó, Santa Catarina, Brazil, December 2017

Borowitzka MA (1999) Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. J Biotechnol 70(1–3):313–321

Borowitzka MA, Moheimani NR (2013) Open pond culture systems. In: Algae for biofuels and energy. Springer, Dordrecht

Brown EJ, Button DK (1979) Phosphate-limited growth kinetics of Selenastrum capricornutum (CHLOROPHYCEAE). J Phycol 15(3):305
Bugbee B (2017) Economics of LED lighting. In: Gupta D (ed) Light emitting diodes for agriculture – smart lighting. Springer, Singapore
Chisholm SW, Brand LE (1981) Persistence of cell division phasing in marine phytoplankton in continuous light after entrainment to light: dark cycles. J Exp Mar Biol Ecol 51(2–3):107–118
Clawson JM, Hoehn A, Stodieck LS, Todd P, Stoner RJ (2000) NASA – review of aeroponics – aeroponics for spaceflight plant growth. Aeroponics DIY. https://aeroponicsdiy.com/nasa-review-of-aeroponics
Crab R, Chielens B, Wille M, Bossier P, Verstraete W (2010) The effect of different carbon sources on the nutritional value of biofloc, a feed for Macrobrachium rosenbergii postlarvae. Aquac Res 41:559–567
Croft MT, Lawrence AD, Raux-Deery E, Warren MJ, Smith AG (2005) Algae acquire vitamin B 12 through a symbiotic relationship with bacteria. Nature 438(7064):90
Delrue F, Álvarez-Díaz PD, Fon-Sing S, Fleury G, Sassi JF (2016) The environmental biorefinery: using microalgae to remediate wastewater, a win-win paradigm. Energies 9(3):132
Deppeler S, Petrou K, Schulz KG, Westwood K, Pearce I, McKinlay J, Davidson A (2018) Ocean acidification of a coastal Antarctic marine microbial community reveals a critical threshold for CO2 tolerance in phytoplankton productivity. Biogeosciences 15(1):209–231
Droop MR (1973) Some thoughts on nutrient limitation in algae. J Phycol 9(3):264–272
Dufault RJ, Korkmaz A (2000) Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertiliser in bell pepper production. Compost Sci Util 3:310–319
Dufault RJ, Korkmaz A, Ward B (2001) Potential of biosolids from shrimp aquaculture as a fertiliser for broccoli production. Compost Sci Util 9:107–114
Durigon EG, Sgnaulin T, Pinho SM, Brol J, Emerenciano MGC (2017) Bioflocos e seus benefícios nutricionais na pré-engorda de tilápias. Aquacult Brasil 8:50–54
Emerenciano M, Cuzon G, Goguenheim J, Gaxiola G (2011) Floc contribution on spawning performance of blue shrimp Litopenaeus stylirostris. Aquac Res 44(1):75–85
Emerenciano MGC, Ballester ELC, Cavalli RO, Wasielesky W (2012) Biofloc technology appli- cation as a food source in a limited water exchange nursery system for pink shrimp Farfantepenaeus brasiliensis (Latreille, 1817). Aquac Res 43(3):447–457
Emerenciano M, Gaxiola G, Cuzon G (2013) Biofloc technology (BFT): a review for aquaculture application and animal food industry. In: Bio-

mass now-cultivation and utilization. InTech, Rijeka
Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M, Miranda-Baeza A (2017) Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture, water quality, In: Hlanganani Tutu (ed). InTech
Furtado PS, Poersch LH, Wasielesky W (2011) Effect of calcium hydroxide, carbonate and sodium bicarbonate on water quality and zootechnical performance of shrimp Litopenaeus vannamei reared in bio-flocs technology (BFT) systems. Aquaculture 321:130–135
Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG, Boyer EW, Howarth RW, Seitzinger SP, Asner GP (2004) Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry 70(2):153–226
Gordon JM, Polle JE (2007) Ultra-high bioproductivity from algae. Appl Microbiol Biotechnol 76 (5):969–975
Gunning D, Maguire J, Burnell G (2016) The development of sustainable saltwater-based food production systems: a review of established and novel concepts. Water 8(12):598. https://doi. org/10.3390/w8120598
Gupta D (ed) (2017) Light emitting diodes for agriculture – smart lighting. Springer, Singapore
Hikosaka Y, Kanechi M, Uno Y (2014) A novel aeroponic technique using dry-fog spray fertigation to grow leaf lettuce (Lactuca sativa L. var. crispa) with water-saving hydroponics. Adv Hortic Sci 28(4):184–189
Joesting HM, Blaylock R, Biber P, Ray A (2016) The use of marine aquaculture solid waste for nursery of salt marsh plants Spartina alterniflora and Juncus roemerianus. Aquac Rep 3:108–114
Khandaker M, Kotzen B (2018) The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. Aquacult Res 23 January 2018. https://doi.org/10.1111/are.13601
Kotzen B, Appelbaum S (2010) An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev Desert. J Appl Aquacult 22(4):297–320. ISSN 1045-4438 (print), 1545-0805 (online). https://doi.org/10.1080/10454438.2010.527571
König B, Junge R, Bittsanszky A, Villarroel M, Komives T (2016) On the sustainability of aquaponics. Ecocycles 2(1):26–32
Kuhn DD, Boardman GD (2008) Use of microbial flocs generated from tilapia effluent as a nutritional supplement for shrimp, Litopenaeus vannamei, in recirculating aquaculture systems. J World Aquacult Soc 39:72–82
Lakhiar IA, Gao J, Naz ST, Chandio FA, Buttar NA (2018) Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics. J Plant Interact 13 (1):338–352. https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308
Langton RW, Haines KC, Lyon RE (1977) Ammonia nitrogen produced by

the bivalve mollusc Tapes japonica and its recovery by the red seaweed Hypnea musciformis in a tropical maricul- ture system. Helgol Wiss Meeresunters 30:217–229

Lenz GL, Durigon EG, Lapa KG, Emerenciano MGC (2017) Produção de alface (Lactuca sativa) em efluentes de um cultivo de tilápias mantidas em sistema BFT em baixa salinidade. Bol Inst Pesca 43:614–630

Martínez-Córdova LR, Emerenciano M, Miranda-Baeza A, Martínez-Porchas M (2015) Microbial-based systems for aquaculture of fish and shrimp: an updated review. Rev Aquac 7(2):131–148

Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M, Emerenciano MG, Miranda-Baeza A, Gollas-Galván T (2017) From microbes to fish the next revolution in food production. Crit Rev Biotechnol 37:287–295

Megahed M (2010) The effect of microbial biofloc on water quality, survival and growth of the green tiger shrimp (Penaeus semisulcatus) fed with different crude protein levels. J Arab Aquacult Soc 5:119–142

Moheimani NR (2016) Tetraselmis suecica culture for CO2 bioremediation of untreated flue gas from a coal-fired power station. J Appl Phycol 28(4):2139–2146

Moheimani NR, Borowitzka MA (2007) Limits to productivity of the alga Pleurochrysis carterae (Haptophyta) grown in outdoor raceway ponds. Biotechnol Bioeng 96(1):27–36

Moheimani NR, Parlevliet D (2013) Sustainable solar energy conversion to chemical and electrical energy. Renew Sust Energ Rev 27:494–504

Moheimani NR, Isdepsky A, Lisec J, Raes E, Borowitzka MA (2011) Coccolithophorid algae culture in closed photobioreactors. Biotechnol Bioeng 108(9):2078–2087

Moheimani NR, Webb JP, Borowitzka MA (2012) Bioremediation and other potential applications of coccolithophorid algae: a review. Algal Res 1(2):120–133

Moheimani NR, Parlevliet D, McHenry MP, Bahri PA, de Boer K (2015) Past, present and future of microalgae cultivation developments. In: Biomass and biofuels from microalgae. Springer, Cham, pp 1–18

Moheimani NR, Vadiveloo A, Ayre JM, Pluske JR (2018) Nutritional profile and in vitro digest- ibility of microalgae grown in anaerobically digested piggery effluent. Algal Res 35:362–369

Munoz R, Guieysse B (2006) Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. Water Res 40(15):2799–2815

NASA Spinoff, Experiments Advance Gardening at Home and in Space, https://spinoff.nasa.gov/ Spinoff2008/ch_3.html

National Geographic, About the common earthworm, https://www.nationalgeographic.com/animals/invertebrates/c/common-earthworm

Neori A, Shpigel M, Ben-Ezra D (2000) A sustainable integrated system for

culture of fish, seaweed, and abalone. Aquaculture 186:279–291
Nwoba EG, Ayre JM, Moheimani NR, Ubi BE, Ogbonna JC (2016) Growth comparison of microalgae in tubular photobioreactor and open pond for treating anaerobic digestion piggery effluent. Algal Res 17:268–276
Nwoba EG, Moheimani NR, Ubi BE, Ogbonna JC, Vadiveloo A, Pluske JR, Huisman JM (2017) Macroalgae culture to treat anaerobic digestion piggery effluent (ADPE). Bioresour Technol 227:15–23
Oswald WJ (1988) Role of microalgae in liquid waste treatment and reclamation. In: Lembi CA, Robert Waaland J (eds) Algae and human affairs. Sponsored by the Phycological Society of America, Inc
Oswald WJ, Gotaas HB (1957) Photosynthesis in sewage treatment. Trans Am Soc Civ Eng 122 (1):73–105
Park JBK, Craggs RJ (2010) Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. Water Sci Technol 61(3):633–639
Parkin GF, Owen WF (1986) Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges. J Environ Eng 112(5):867–920
Pinheiro I, Arantes R, Santo CME, Seiffert WQ (2017) Production of the halophyte Sarcocornia ambigua and Pacific white shrimp in an aquaponic system with biofloc technology. Ecol Eng 100:261–267
Pinho SM (2018) Tilapia nursery in aquaponics systems using bioflocs technology. A thesis presented at aquaculture Centre of Sao Paulo State University. Degree of Master of Science, Jaboticabal, Sao Paulo, Brazil, February 2018
Pinho SM, Molinari D, De Mello GL, Fitzsimmons KM, Emerenciano MGC (2017) Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of differente lettuce varieties. Ecol Eng 103:146–153
Poleo G, Aranbarrio JV, Mendoza L, Romero O (2011) Cultivo de cachama blanca en altas densidades y en dos sistemas cerrados. Pesq Agrop Brasileira 46(4):429–437
Poli MA, Schveitzer R, Nuñerr APO (2015) The use of biofloc technology in a South American catfish (Rhamdia quelen) hatchery: effect of suspended solids in the performance of larvae. Aquac Eng 66:17–21
Rahman SSA (2010) Effluent water characterization of intensive Tilapia culture units and its application in an integrated lettuce aquaponic production facility. A thesis submitted to the graduate faculty. Auburn University, Degree of Master of Science, Auburn Alabama, December 13 2010
Rakocy JE (2012) Aquaponics – integrating fish and plant culture. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture Production Systems, 1st edn. Wiley-Blackwell, Oxford, pp 343–386
Ray AJ, Lewis BL, Browdy CL, Leffler JW (2010) Suspended solids removal

to improve shrimp (Litopenaeus vannamei) production and an evaluation of a plant-based feed in minimal- exchange, superintensive culture systems. Aquaculture 299:89–98
Richmond A, Becker EW (1986) Technological aspects of mass cultivation, a general outline. In: CRC handbook of microalgal mass culture, CRC Press, Boca Raton, pp 245–263
Rocha AF, Biazzetti Filho ML, Stech MR, Silva RP (2017) Lettuce production in aquaponic and biofloc systems with silver catfish Rhamdia quelen. Bol Inst Pesca 44:64–73
Schoumans OF, Chardon WJ, Bechmann ME, Gascuel-Odoux C, Hofman G, Kronvang B et al (2014) Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: a review. Sci Total Environ 468:1255–1266
Sgnaulin T, Mello GL, Thomas MC, Esquivel-Garcia JR, Oca GARM, Emerenciano MGC (2018) Biofloc technology (BFT): an alternative aquaculture system for Piracanjuba Brycon orbignyanus? Aquaculture 485:119–123
Sharpley AN, Kleinman PJ, Heathwaite AL, Gburek WJ, Folmar GJ, Schmidt JP (2008) Phospho- rus loss from an agricultural watershed as a function of storm size. J Environ Qual 37 (2):362–368
Shifrin NS, Chisholm SW (1981) Phytoplankton lipids: interspecific differences and effects of nitrate, silicate and light-dark cycles. J Phycol 17(4):374–384
Smith VH (1983) Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. Science 221(4611):669–671
Stoknes K, Scholwin F, Krzesiński W, Wojciechowska E, Jasińska A (2016) Efficiency of a novel "food to waste to food" system including anaerobic digestion of food waste and cultivation of vegetables on digestate in a bubble-insulated greenhouse. Waste Manag 56:466–476. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.027
Stokstad E (2010) Down on the shrimp farm. Science 328:1504–1505
Storey, A., 2015, Vertical farming costs and the math behind them, posted 6 October 2015 https://blog.brightagrotech.com/vertical-farming-costs-and-the-math-behind-them/
Tibbitts TW, Cao W, and Wheeler RM (1994) Growth of potatoes for CELSS. NASA Contractor Report 177646
Touliatos D, Dodd IC, McAinsh M (2016) Vertical farming increases lettuce yield per unit areacompared to conventional horizontal hydroponics. Food and Energy Security 5(3):184–191
Turcios AE, Papenbrock J (2014) Sustainable treatment of aquaculture effluents – what can we learn for the past for the future? Sustainability 6:836–856
Virsile A, Olle M, Duchovskis P (2017) LED lighting in horticulture. In:

Gupta D (ed) Light emitting diodes for agriculture – smart lighting. Springer, Singapore

Waller U, Buhmann AK, Ernst A, Hanke V, Kulakowski A, Wecker B, Orellana J, Papenbrock J (2015) Integrated multi-trophic aquaculture in a zero-exchange recirculation aquaculture system for marine fish and hydroponic halophyte production. Aquac Int 23:1473–1489

Weathers PJ, Zobel RW (1992) 1992, Aeroponics for the culture of organisms. Tissues Cells Biotechnol Adv 10(1):93–115

Wijihastuti RS, Moheimani NR, Bahri PA, Cosgrove JJ, Watanabe MM (2017) Growth and photosynthetic activity of Botryococcus braunii biofilms. J Appl Phycol 29(3):1123–1134

Zhao Z, Xu Q, Luo L, Wang CA, Li J, Wang L (2014) Effect of feed C/N ratio promoted bioflocs on water quality and production performance of bottom and filter feeder carp in minimum-water exchanged pond polyculture system. Aquaculture 434:442–448

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

3 Parte

PERSPECTIVA PARA UN DESARROLLO SUSTENTABLE

Capítulo 13

DIETAS DE PESCADO EN ACUAPONÍA

Lidia Robaina, Juhani Pirhonen, Elena Mente, Javier Sánchez, and Neill Goosen

Capítulo 13
DIETAS DE PESCADO EN ACUAPONÍA

Lidia Robaina, Juhani Pirhonen, Elena Mente, Javier Sánchez, and Neill Goosen

Resumen

Los peces y los desechos alimenticios proporcionan la mayoría de los nutrientes requeridos por las plantas en acuaponía si se mantiene la proporción óptima entre los insumos diarios de alimento para peces y el área de cultivo de plantas. Por lo tanto, el alimento para peces necesita cumplir con los requisitos nutricionales de los peces y las plantas en un sistema acuapónico. Una estrategia de producción controlada de desechos de pescado donde se manipulan y utilizan los contenidos de nitrógeno, fósforo y minerales de las dietas de peces proporciona una forma de influir en las tasas de acumulación de nutrientes, reduciendo así la necesidad de suplementos adicionales de nutrientes. Para optimizar el rendimiento y la rentabilidad de la producción de acuaponía, las dietas y los horarios de alimentación de los peces deben diseñarse cuidadosamente para proporcionar nutrientes al nivel y el tiempo adecuados para complementar los peces, las bacterias y las plantas. Para lograr esto, se puede optimizar un alimento hidropónico a la medida específica de la especie para que se adapte al sistema de acuaponía en su conjunto. El punto óptimo se determinaría en función de los parámetros generales de rendimiento del sistema, incluidas las medidas de sostenibilidad económica y ambiental. Por lo tanto, este capítulo se centra en las dietas y piensos para peces y revisa el estado del arte en dietas, ingredientes y

L. Robaina (*)
Aquaculture Research Group (GIA), Ecoaqua Institute, University of Las Palmas de Gran Canaria, Telde, Gran Canaria, Spain
E-mail: lidia.robaina@ulpgc.es
J. Pirhonen
Department of Biological and Environmental Science, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland
E-mail: juhani.pirhonen@jyu.fi
E. Mente
Department of Ichthyology and Aquatic Environment, University of Thessaly, Volos, Greece
E-mail: emente@uth.gr
J. Sánchez
Department of Physiology, Faculty of Biology, Regional Campus of International Excellence "Campus Mare Nostrum", University of Murcia, Murcia, Spain
E-mail: javisan@um.es
N. Goosen
Department of Process Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa
E-mail: njgoosen@sun.ac.za

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_13

aditivos para peces, así como los desafíos nutricionales / sostenibles que deben tenerse en cuenta al producir alimentos acuapónicos específicos.

Palabras clave Dietas acuapónicas; Sostenibilidad; Subproductos alimenticios; Flujo de nutrientes; Requisitos nutricionales y Tiempos de alimentación

13.1 INTRODUCCIÓN

Se reconoce que los alimentos acuáticos son beneficiosos para la nutrición y la salud humana y desempeñarán un papel esencial en futuras dietas sostenibles y saludables (Beveridge et al. 2013). Para lograr esto, el sector acuícola mundial debe contribuir a aumentar la cantidad y la calidad de los suministros de peces desde ahora hasta 2030 (Thilsted et al. 2016). Este crecimiento debe promoverse no solo aumentando la producción y / o el número de especies, sino también mediante la diversificación de sistemas. Sin embargo, los peces de la acuicultura se han incluido recientemente en el debate sobre seguridad alimentaria, nutrición (FSN) estrategias y políticas futuras, lo que demuestra el importante papel de esta producción para prevenir la desnutrición en el futuro (Bénét et al. 2015), Los peces proporcionan una buena fuente de proteínas y grasas insaturadas, así como minerales y vitaminas. Es importante señalar que muchas naciones africanas están promoviendo la acuicultura como la respuesta a algunos de sus desafíos actuales y futuros de producción de alimentos. Incluso en Europa, la oferta de pescado actualmente no es autosuficiente (con una oferta / demanda interna desequilibrada), ya que depende cada vez más de las importaciones. Por lo tanto, garantizar el desarrollo exitoso y sostenible de la acuicultura global es una agenda imprescindible para la economía global y europea (Kobayashi et al. 2015). La sostenibilidad generalmente se requiere para mostrar tres aspectos clave: aceptabilidad ambiental, equidad social y viabilidad económica. Los sistemas acuapónicos brindan la oportunidad de ser sostenibles, al combinar sistemas de producción animal y vegetal de una manera rentable, respetuosa con el medio ambiente y socialmente beneficiosa. Para Staples y Funge-Smith (2009), el desarrollo sostenible es el equilibrio entre el bienestar ecológico y el bienestar humano, y en el caso de la acuicultura, un enfoque ecosistémico se ha entendido recientemente como un área prioritaria para la investigación.

La acuicultura ha sido el sector de producción de alimentos de más rápido crecimiento durante los últimos 40 años (Tveterås et al. 2012), siendo una de las actividades agrícolas más prometedoras para satisfacer las necesidades mundiales de alimentos en el futuro cercano (Kobayashi et al. 2015). Las estadísticas de producción total de la acuicultura (FAO 2015) revelan un incremento anual en la producción mundial del 6%, que se espera que

proporcione hasta el 63% del consumo mundial de pescado para 2030 (FAO 2014), para una población estimada de nueve mil millones de personas en 2050. En el caso de Europa, el aumento previsto se observa no solo en el sector marino sino también en los productos producidos en el territorio. Algunos de los desafíos esperados para el crecimiento de la acuicultura durante los próximos años son la reducción en el uso de antibióticos y otros tratamientos patológicos, el desarrollo de sistemas y equipos de acuicultura eficientes, junto con la diversificación de especies y una mayor sostenibilidad en el área de producción de alimentos y uso de alimento. El cambio de harina de pescado (FM) en el alimento a otras fuentes de proteínas también es un desafío importante, así como las proporciones de "pesca-pesca". Hay una larga historia, que se remonta a la década de 1960, de promover el crecimiento del sector de la acuicultura hacia una sostenibilidad adecuada, incluido el estímulo para adaptar y crear fórmulas de alimentos nuevas y más sostenibles, reducir el derrame de alimentos y reducir la tasa de conversión de alimentos (FCR).

Aunque la acuicultura es reconocida como el sector de producción animal más eficiente, en comparación con la producción de animales terrestres, todavía hay espacio para mejorar en términos de eficiencia de recursos, diversificación de especies o métodos de producción, y además una clara necesidad de un enfoque ecosistémico que tome en su totalidad aprovechar el potencial biológico de los organismos y proporcionar una consideración adecuada de los factores ambientales y sociales (Kaushik 2017). Este crecimiento en la producción acuícola deberá ser respaldado por un aumento en la producción total de alimento esperada. Se necesitarán aproximadamente tres millones de toneladas adicionales de alimento cada año para apoyar el crecimiento de la acuicultura esperado para 2030. Además, se necesita reemplazar la harina de pescado y el aceite de pescado (FO) con sustitutos de plantas y terrestres, lo que requiere una investigación esencial en alimentos de fórmula para la cría de animales. Las industrias de alimentación animal y acuícola son parte de un sector de producción global, que también es el foco de las futuras estrategias de desarrollo. La encuesta anual de Alltech (Alltech 2017) revela que la producción total de alimentos para animales superó los mil millones de toneladas métricas, con un aumento del 3.7% en la producción desde 2015 a pesar de una disminución del 7% en el número de fábricas de piensos. China y los EE. UU. dominaron la producción en 2016, representando el 35% de la producción total de alimentos del mundo. La encuesta indica que los 10 principales países productores tienen más de la mitad de las fábricas de alimentos del mundo (56%) y representan el 60% de la producción total de alimentos. Esta concentración en la producción significa que muchos de los ingredientes clave utilizados tradicionalmente en formulaciones para alimentos de acuicultura comercial son

productos comercializados internacionalmente, lo que somete la producción de alimentos acuícolas a cualquier volatilidad del mercado global. Por ejemplo, se espera que la harina de pescado se duplique en 2030, mientras que el aceite de pescado probablemente aumente en más del 70% (Msangi et al. 2013). Esto ilustra la importancia de reducir la cantidad de estos ingredientes en el alimento para peces al tiempo que aumenta el interés y se enfoca en fuentes nuevas o alternativas (García-Romero et al. 2014a, b; Robaina et al. 1998, 1999; Terova et al. 2013; Torrecillas et al.2017). Si bien se han desarrollado nuevas plataformas en alta mar para la producción acuícola, también hay un enfoque significativo en los sistemas de recirculación de agua marina y marina (RAS), ya que estos sistemas usan menos agua por kg de alimento para peces, lo que aumenta la producción de peces al tiempo que reduce los impactos ambientales de la acuicultura. incluidas reducciones en el uso del agua (Ebeling y Timmons 2012; Kingler y Naylor 2012). El RAS puede integrarse con la producción de plantas en sistemas acuapónicos, que se adaptan fácilmente a los modelos de sistemas alimentarios locales y regionales (ver Capítulo 15) que se pueden practicar en o cerca de grandes centros de población (Love et al. 2015a). El agua, la energía y la alimentación de peces son los tres mayores insumos físicos para los sistemas acuapónicos (Love et al. 2014, 2015b). Aproximadamente el 5% del alimento no es consumido por los peces de cultivo, mientras que el 95% restante es ingerido y digerido (Khakyzadeh et al. 2015). De esta proporción, el 30-40% se retiene y se convierte en nueva biomasa, mientras que el 60-70% restante se libera en forma de heces, orina y amoníaco (FAO 2014). En promedio, 1 kg de alimento (30% de proteína cruda) libera globalmente alrededor de 27,6 g de N, y 1 kg de biomasa de pescado libera alrededor de 577 g de DBO (demanda biológica de oxígeno), 90,4 g de N y 10,5 g de P (Tyson et al.2011).

Actualmente, la acuaponía es un sector pequeño pero de rápido crecimiento que está claramente adaptado para aprovechar los siguientes desafíos políticos y socioeconómicos, donde 1) los productos acuáticos satisfacen la necesidad de seguridad alimentaria y nutrición, 2) se establecen regiones autosuficientes para peces en el mundo, 3) la acuicultura es un sector clave, pero los ingredientes globales y la producción mundial de alimentos se enfocan, 4) la innovación en la agricultura promueve la biodiversidad de formas más sostenibles y como parte de la economía circular y 5) hay una mayor aceptación de alimentos producidos localmente. Estos aspectos se relacionan con las recomendaciones de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Le Gouvello et al.2017), consideraron la sostenibilidad de la acuicultura y la alimentación de peces, que recomendó que se hicieran esfuerzos para localizar la producción acuícola y la circular, para poner en marcha un programa de control de calidad para nuevos pro-

ductos y subproductos, así como para procesar alimentos locales para peces dentro de las regiones. Hasta ahora, la acuaponía como "granjas acuícolas de pequeña escala" podría proporcionar ejemplos para la implementación de la bioeconomía y la producción a escala local, promoviendo así formas de usar productos y subproductos de materia orgánica que no son adecuados para otros fines, p.Ej. insectos y gusanos de cultivo, macro y microalgas, hidrolizados de peces y subproductos, nuevas plantas producidas en agroecología y bioactivos y micronutrientes producidos localmente, al tiempo que reduce la huella ambiental con la producción de alimentos de calidad (peces y plantas) y avanza hacia la generacion de cero desperdicios. Además, la acuaponía proporciona un buen ejemplo para promover una forma multidisciplinaria de aprendizaje sobre la producción sostenible y la valorización de los recursos biológicos, p. el "Proyecto Islandap" (INTERREG V-A MAC 2014- 2020) (figura 13.1).

Las siguientes secciones de este capítulo revisan el estado del arte de las dietas, ingredientes y aditivos para peces, así como los desafíos nutricionales / sostenibles a tener en cuenta al producir alimentos Acuapónicos específicos.

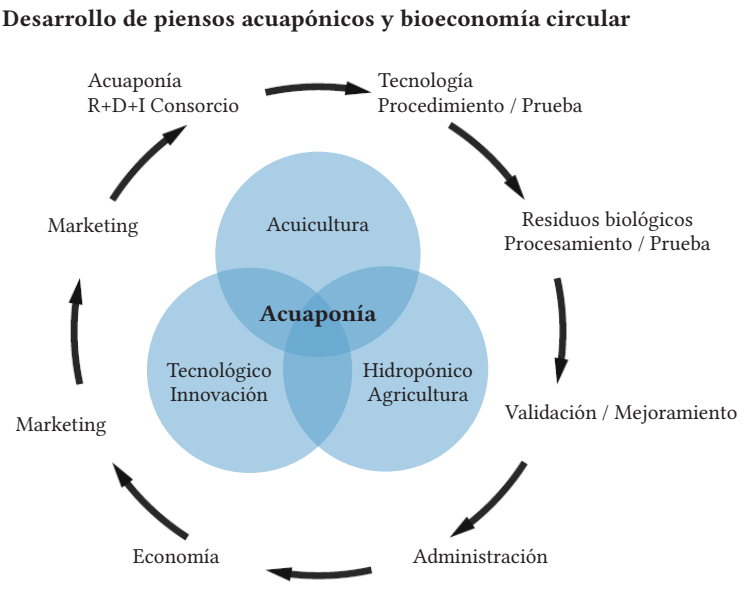


Fig. 13.1 Representación esquemática de un enfoque multidisciplinario para valorizar localmente los bioproductos para dietas acuapónicas. (Basado en "I + D + I hacia el desarrollo acuapónico en las islas ultraperiféricas y la economía circular"; proyecto ISLANDAP, Interreg MAC / 1.1a /2072014-2019).

13.2 DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA NUTRICIÓN DE LOS PECES.

El desarrollo sostenible de la nutrición de peces en la acuicultura deberá corresponder con los desafíos que la acuaponía ofrece con respecto a la creciente necesidad de producir alimentos de alta calidad. Manipular el contenido de nitrógeno, fósforo y minerales de las dietas de pescado utilizadas en acuaponía es una forma de influir en las tasas de acumulación de nutrientes, reduciendo así la necesidad de la suplementación artificial y externa de nutrientes. De acuerdo con Rakocy et al. (2004), los peces y los desechos alimenticios proporcionan la mayoría de los nutrientes requeridos por las plantas si se mantiene la relación óptima entre el aporte diario de alimento para peces y las áreas de cultivo de plantas. Los desechos de peces sólidos llamados 'lodos' en los sistemas de acuaponía resultan en la pérdida de aproximadamente la mitad de los nutrientes de entrada disponibles, especialmente fósforo, que en teoría podrían usarse para la producción de biomasa vegetal, pero la información aún es limitada (Delaide et al.2017; Goddek et al.2018) Si bien el objetivo de la sostenibilidad en la nutrición de los peces en la acuicultura se logrará en el futuro mediante el uso de dietas a medida, los alimentos para peces en acuaponía deben cumplir con los requisitos nutricionales tanto para los peces como para las plantas. El aumento de la sostenibilidad se derivará en parte de una menor dependencia de la harina de pescado (FM) y el aceite de pescado (FO) y de ingredientes naturales crudos novedosos, de alta energía y baja huella de carbono. Para salvaguardar la biodiversidad y el uso sostenible de los recursos naturales, el uso de FM y FO basados en la pesca silvestre debe limitarse en los alimentos acuícolas (Tacon y Metian 2015). Sin embargo, el rendimiento del pescado, la salud y la calidad del producto final pueden verse alterados al sustituir la dieta de la FM con ingredientes alternativos. Por lo tanto, la investigación en nutrición de peces se centra en el uso eficiente y la transformación de los componentes de la dieta para proporcionar los nutrientes esenciales necesarios que maximizarán el rendimiento del crecimiento y alcanzarán una acuicultura sostenible y resistente. Reemplazar FM, que es una fuente de proteínas excelente pero costosa en las dietas de pescado, no es sencillo debido a su perfil único de aminoácidos, alta digestibilidad de nutrientes, alta palatabilidad, cantidades adecuadas de micronutrientes, así como la falta general de anti- factores nutricionales (Gatlin et al. 2007).

Muchos estudios han demostrado que la FM puede ser reemplazada con éxito por harina de soya en alimentos acuícolas, pero la harina de soya tiene factores anti nutricionales como los inhibidores de tripsina, aglutini-

na y saponina de soya, que limitan su uso y altos porcentajes de reemplazo en la cría de peces carnívoros. El alto reemplazo de FM por las comidas vegetales en las dietas de pescado también puede reducir la biodisponibilidad de nutrientes en los peces, lo que resulta en alteraciones de nutrientes en la calidad final del producto (Gatlin et al. 2007). También puede causar perturbaciones no deseadas en el medio ambiente acuático (Hardy 2010) y reducir el crecimiento de peces debido a los niveles reducidos de aminoácidos esenciales (especialmente metionina y lisina), y una palatabilidad reducida (Krogdahl et al. 2010). Gerile y Pirhonen (2017) señalaron que un reemplazo de FM al 100% con harina de gluten de maíz redujo significativamente la tasa de crecimiento de la trucha arcoiris, pero el reemplazo de FM no afectó el consumo de oxígeno o la capacidad de nado. Los altos niveles de material vegetal también pueden afectar la calidad física de los gránulos y pueden complicar el proceso de fabricación durante la extrusión. La mayoría de las fuentes alternativas de nutrientes derivados de plantas para alimentos para peces contienen una amplia variedad de factores anti nutricionales que interfieren con el metabolismo de las proteínas de los peces al afectar la digestión y la utilización, lo que conduce a una mayor liberación de N en el medio ambiente que puede afectar la salud y el bienestar de los peces. Además, las dietas que incluyen altos niveles de ácido fítico alteraron la digestión de fósforo y proteínas que conducen a una alta liberación de N y P en el ambiente circundante. El consumo de alimento y la palatabilidad, la digestibilidad y la retención de nutrientes pueden variar de acuerdo con la tolerancia y los niveles de las especies de peces y pueden cambiar la cantidad y la composición de los desechos de pescado. Teniendo en cuenta estos resultados, las formulaciones de dietas para peces en acuaponía deberían investigar los niveles dietéticos de 'tolerancia' de los factores anti nutricionales (es decir, fitato) para diferentes ingredientes alimenticios y para cada especie de pescado utilizada en acuaponía y también los efectos de la adición de minerales tales como Zn y fosfato en las dietas. También se debe tener en cuenta que incluso si el material vegetal se considera una opción ecológicamente racional para reemplazar la FM en los alimentos acuícolas, las plantas necesitan riego y, por lo tanto, pueden inducir impactos ecológicos en forma de agua y huellas ecológicas (Pahlow et al. 2015) de escorrentía de nutrientes en los campos. Subproductos de animales terrestres como las proteínas animales procesadas no rumiantes (PAP) derivadas de animales de granja monogástricos (por ejemplo, aves de corral, cerdo) que son aptos para el consumo humano en el punto de sacrificio (materiales de Categoría 3, regulación CE 142/2011; RegulationC regulación 56/2013) también podría reemplazar a FM y apoyar la economía circular. Tienen un mayor contenido de proteínas, perfiles de aminoácidos más favorables y menos carbohidratos en comparación con los ingredientes de los piensos, a la vez que carecen de factores antinutricionales (Hertrampf y

Piedad-Pascual 2000). Se ha demostrado que las comidas de carne y huesos pueden servir como una buena fuente de fósforo cuando se incluye en la dieta de la tilapia del Nilo (Ashraf et al. 2013), aunque está estrictamente prohibido en la alimentación de animales rumiantes debido al peligro de iniciar encefalopatía espongiforme bovina (enfermedad de las vacas locas). Ciertas especies de insectos, como la mosca del soldado negro (Hermetia illucens), podrían usarse como una fuente alternativa de proteínas para dietas sostenibles de alimentación de peces. Las principales ventajas ambientales de la cría de insectos son que (a) se requiere menos tierra y agua, (b) que las emisiones de gases de efecto invernadero son más bajas y que (c) los insectos tienen altas eficiencias de conversión de alimento (Henry et al. 2015). Sin embargo, existe una necesidad continua de mas investigación para proporcionar

13.3.1 Fuentes de proteínas y lípidos para alimentos acuícolas

Desde finales del siglo XX, se han producido cambios significativos en la composición de los alimentos acuícolas, pero también avances en la fabricación. Estas transformaciones se originaron en la necesidad de mejorar la rentabilidad económica de la acuicultura, así como de mitigar sus impactos ambientales. Sin embargo, la fuerza impulsora detrás de estos cambios es la necesidad de disminuir la cantidad de harina de pescado (FM) y aceite de pescado (FO) en los alimentos, que tradicionalmente han constituido la mayor proporción de alimentos, especialmente para peces carnívoros y camarones.

En parte debido a la sobrepesca, pero especialmente debido al aumento continuo en el volumen mundial de la acuicultura, existe una creciente necesidad de proteínas y aceites alternativos para reemplazar la FM y la FO en los alimentos acuícolas.

La composición de los alimentos para peces ha cambiado considerablemente a medida que la proporción de FM en las dietas ha disminuido de > 60% en la década de 1990 a < 20% en las dietas modernas para peces carnívoros como el salmón del Atlántico (Salmo salar), y el contenido de FO ha disminuido de 24 % a 10% (Ytrestøyl et al.2015). Como consecuencia, la llamada relación pescado-pescado-pescado (FIFO) ha disminuido por debajo de 1 para el salmón y la trucha arco iris, lo que significa que la cantidad de pescado necesaria en el alimento para producir 1 kg de carne de pescado es inferior a 1 kg (Fig. 13.2). Por lo tanto, la cultura de los peces carnívoros en el siglo XXI es un productor neto de peces. Por otro lado, los alimentos para especies de peces omnívoros tróficos inferiores (por ejemplo, carpa y tilapia) pueden contener menos del 5% de FM (Tacon et al. 2011). La cría de

estas especies de peces tróficos bajos es ecológicamente más sostenible que para las especies tróficas más altas, y FIFO para tilapia fue de 0.15 y para los ciprínidos (especies de carpas) solo 0.02 en 2015 (IFFO). Cabe señalar que el reemplazo total de FM en las dietas de tilapia (Koch et al. 2016) y salmón (Davidson et al. 2018) no es posible sin afectar significativamente los parámetros de producción.

Hoy en día, el principal suministro de proteínas y lípidos en los alimentos para peces proviene de las plantas, pero también comúnmente de otros sectores, incluidas las comidas y grasas de subproductos de carne y aves y harina de sangre (Tacon y Metian 2008). Además, los deseños y subproductos del procesamiento de pescado (despojos y recortes de desechos) se usan comúnmente para producir FM y FO. Sin embargo, debido a las regulaciones de la UE (CE 2009), el uso de FM de una especie no está permitido como alimento para la misma especie, p. el salmón no se puede alimentar con FM que contenga recortes de salmón.

Los reemplazos de FM y FO con otros ingredientes pueden afectar la calidad del producto que se vende a los clientes. El pescado tiene la reputación de ser un alimento saludable, especialmente debido a su alto contenido de poli y ácidos grasos altamente insaturados. Lo más importante es que los mariscos son la única fuente de EPA (ácido eicosapentaenoico) y DHA (ácido docosahexaenoico), que son ácidos grasos omega^{-3} y nutrientes esenciales para muchas funciones en el cuerpo humano.

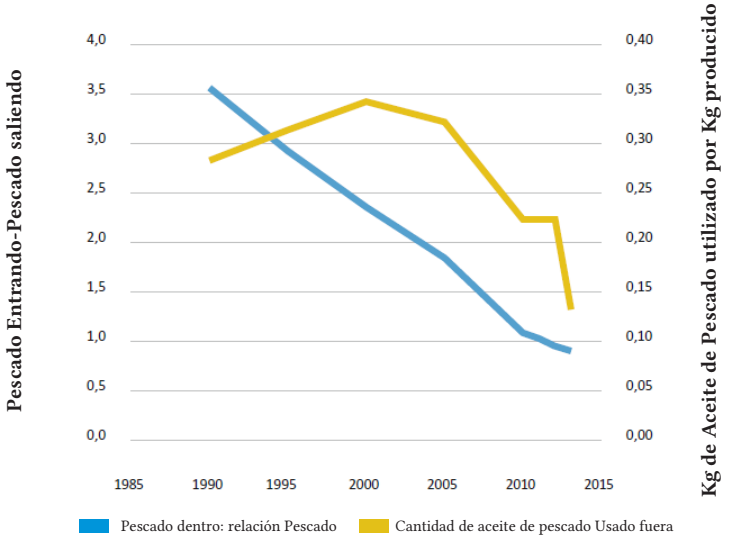


Fig. 13.2 Proporción de peces peces (línea azul, eje y izquierdo) y la cantidad de aceite de pescado utilizado (línea amarilla, eje y derecho) para la alimentación de la trucha arco iris en Finlandia entre 1990 y 2013. (Datos de www.raisioagro.com)

Si FM y FO se reemplazan con productos de origen terrestre, esto afectará directamente la calidad de la carne de pescado, sobre todo su composición de ácidos grasos, ya que la proporción de ácidos grasos omega-3 (especialmente EPA y DHA) disminuirá mientras que la cantidad de ácidos grasos omega-6 aumentará junto con el aumento del material vegetal que está reemplazando a FM y FO (Lazzarotto et al.2018). Como tal, los beneficios para la salud del consumo de pescado se pierden en parte, y el producto que termina en el plato no es necesariamente lo que los consumidores esperaban comprar. Sin embargo, con el fin de superar el problema de la disminución de los ácidos grasos omega-3 en el producto final resultante de la disminución de los ingredientes de pescado en los alimentos acuícolas, los granjeros de pescado podrían emplear las llamadas dietas de acabado con alto contenido de FO durante las etapas finales de cultivo (Suomela et al. 2017).

Una nueva opción interesante para reemplazar los alimentos para peces FO es la posibilidad de la ingeniería genética, es decir, plantas modificadas genéticamente que pueden producir EPA y DHA, Pej. El aceite de Camelina sativa genéticamente modificado (nombre común de camelina, oro de placer o falsa fosa que se sabe que tiene altos niveles de ácidos grasos omega-3) se utilizó con éxito para cultivar salmón, terminando con una concentración muy alta en EPA y DHA en los peces (Betancor et al. 2017). Sin embargo, el uso de organismos genéticamente modificados en la producción de alimentos para humanos está sujeto a la aprobación regulatoria y puede no ser una opción a corto plazo.

Otra nueva posibilidad para reemplazar la FM en los alimentos acuícolas son las proteínas hechas de insectos (Makkar et al. 2014). Esta nueva opción ha sido posible dentro de la UE solo recientemente cuando la UE cambió la legislación, permitiendo las comidas de insectos en los alimentos acuícolas (UE 2017). Las especies que se permiten utilizar son la mosca soldado negra (Hermetia illucens), la mosca común (Musca domestica), el gusano amarillo (Tenebrio molitor), el gusano menor (Alphitobius diaperinus), el grillo doméstico (Acheta domesticus), el grillo anillado (Gryllodes sigillatus) y campo de cricket (Gryllus assimilis). Los insectos deben criarse en ciertos sustratos permitidos. Los experimentos de crecimiento realizados con diferentes especies de peces muestran que reemplazar FM con harina hecha de larvas de mosca negra no necesariamente compromete el crecimiento y otros parámetros de producción (Van Huis y Oonincx 2017). Por otro lado, las comidas hechas de gusano amarillo podrían reemplazar la FM solo parcialmente para evitar una disminución en el crecimiento (Van Huis y Oonincx 2017). Sin embargo, el reemplazo de FM con harina de insectos puede causar una caída en los ácidos grasos omega-3, ya que care-

cen de EPA y DHA (Makkar y Ankers 2014).

A diferencia de los insectos, las microalgas suelen tener perfiles nutricionalmente favorables de aminoácidos y ácidos grasos (incluidos EPA y DHA), pero a este respecto también existe una amplia variación entre especies. El reemplazo parcial de FM y FO en alimentos acuícolas con ciertas microalgas ha dado resultados prometedores (Camacho-Rodríguez et al. 2017; Shah et al. 2018) y en el futuro se puede esperar que el uso de microalgas en alimentos acuícolas aumente (White 2017) incluso aunque su uso puede estar limitado por el precio.

Este breve resumen de los ingredientes potenciales del alimento indica que existe una amplia gama de posibilidades para reemplazar al menos parcialmente los alimentos para peces FM y FO. En general, el perfil de aminoácidos de FM es óptimo para la mayoría de las especies de peces y FO contiene DHA y EPA que son prácticamente imposibles de proporcionar a partir de aceites terrestres, aunque la ingeniería genética puede cambiar la situación en el futuro. Sin embargo, los productos OGM primero deben ser aceptados en la legislación y luego por los clientes.

13.3.2 El uso de aditivos alimentarios especializados diseñados para acuaponía

Adaptar los alimentos acuícolas que son específicos para los sistemas acuapónicos es más desafiante que el desarrollo de alimentos convencionales para la acuicultura, ya que la naturaleza de los sistemas acuapónicos requiere que los alimentos acuícolas no solo suministren nutrición a los animales cultivados, sino también a las plantas cultivadas y a las comunidades microbianas que habitan el sistema.

La práctica actual de acuaponía utiliza alimentos acuícolas formulados para proporcionar una nutrición óptima a los animales acuáticos cultivados; sin embargo, como el principal aporte de nutrientes a los sistemas acuapónicos (Roosta y Hamidpour 2011; Tyson et al. 2011; Junge et al. 2017), los alimentos también deben tener en cuenta los requerimientos de nutrientes del componente de producción de la planta. Esto es especialmente importante para los sistemas de acuaponía a escala comercial, donde la productividad del sistema de producción de plantas tiene un impacto importante en la rentabilidad general del sistema (Adler et al. 2000; Palm et al. 2014; Love et al. 2015a) y donde la producción mejora El rendimiento del componente de la planta puede mejorar significativamente la rentabilidad general del sistema.

Por lo tanto, el objetivo general de desarrollar alimentos acuapónicos a medida sería diseñar un alimento que logre un equilibrio entre el suministro de nutrientes adicionales para las plantas, mientras se mantiene un funcionamiento aceptable del sistema acuapónico (es decir, una calidad de agua suficiente para la producción animal, el rendimiento del biofiltro y el digestor anaerobio, y la absorción de nutrientes por plantas). Para lograr esto, la alimentación acuapónica a medida final puede no ser óptima para la producción de plantas o animales acuáticos individualmente, sino que sería óptima para el sistema acuapónico en su conjunto. El punto óptimo se determinaría en función de los parámetros generales de rendimiento del sistema, pEj. medidas de sostenibilidad económica y / o ambiental.

Uno de los principales desafíos para aumentar la producción de los sistemas acuapónicos acoplados es la concentración relativamente baja de nutrientes de macro y micro plantas (principalmente en forma inorgánica) en el agua de recirculación, en comparación con los sistemas hidropónicos convencionales. Estos bajos niveles de nutrientes pueden dar lugar a deficiencias de nutrientes en las plantas y tasas de producción de plantas subóptimas (Graber y Junge 2009; Kloas et al. 2015; Goddek et al. 2015; Bittsanszky et al. 2016; Delaide et al.2017). Otro desafío son las cantidades significativas de cloruro de sodio en los alimentos acuícolas convencionales a base de harina de pescado y la posible acumulación de sodio en los sistemas acuapónicos (Treadwell et al. 2010). Se pueden desarrollar diferentes enfoques para abordar estos desafíos, como soluciones tecnológicas, pEj. sistemas acuapónicos desacoplados (Goddek et al.2016) (ver también el capítulo 8), suplementación directa de nutrientes en el sistema de producción de plantas mediante pulverización foliar o adición al agua de recirculación (Rakocy et al. 2006; Roosta y Hamidpour 2011), o el cultivo de una mejor planta tolerante a la sal (ver cap. 12). Un nuevo enfoque es el desarrollo de alimentos acuícolas adaptados específicamente para su uso en acuaponía.

Para abordar la escasez de nutrientes de las plantas en acuaponía, los alimentos adaptados para acuaponía deben aumentar la cantidad de nutrientes disponibles para las plantas, ya sea aumentando las concentraciones de nutrientes específicos después de la excreción por los animales cultivados, o haciendo que los nutrientes estén más biodisponibles después de la excreción. y biotransformación, para una rápida absorción por las plantas. Sin embargo, lograr este aumento de la excreción de nutrientes no es tan simple como suplementar mayores cantidades de los nutrientes deseados a las dietas de acuicultura, ya que hay muchos factores (a menudo conflictivos) que deben considerarse en un sistema hidropónico integrado. Por ejemplo, aunque la producción óptima de la planta requerirá mayores concentraciones de nutrientes específicos, ciertos minerales, pEj. ciertas

formas de hierro y selenio pueden ser tóxicas para los peces incluso a bajas concentraciones y, por lo tanto, tendrían niveles máximos permitidos en el agua circulante (Endut et al. 2011; Tacon 1987). Además de los niveles totales de nutrientes, la relación entre nutrientes (por ejemplo, la relación P: N) también es importante para la producción de plantas (Buzby y Lin 2014), y los desequilibrios en las relaciones entre nutrientes pueden conducir a la acumulación de ciertos nutrientes en los sistemas acuapónicos. (Kloas et al. 2015). Además, incluso si un alimento hidropónico aumenta los niveles de nutrientes de la planta, la calidad general del agua y el pH del sistema aún deben mantenerse dentro de límites aceptables para garantizar una producción animal aceptable, una absorción eficiente de nutrientes por las raíces de las plantas, el funcionamiento óptimo de los biofiltros y los digestores anaeróbicos (Goddek et al. al.2015b; Rakocy et al. 2006) y para evitar la precipitación de ciertos nutrientes importantes como los fosfatos, ya que esto hará que no estén disponibles para las plantas (Tyson et al. 2011). Lograr este equilibrio general no es tarea fácil, ya que existen interacciones complejas entre las diferentes formas de nitrógeno en el sistema (NH3, NH4 +, NO2, NO3), el pH del sistema y la variedad de metales y otros iones presentes en el sistema (Tyson y col. 2011; Goddek y col. 2015; Bittsanszky y col. 2016) Escasez común de nutrientes en los sistemas acuapónicos las plantas requieren una variedad de macro y micronutrientes para su crecimiento y desarrollo. Los sistemas acuapónicos son comúnmente deficientes en los macronutrientes de la planta: potasio (K), fósforo (P), hierro (Fe), manganeso (Mn) y azufre (S) (Graber y Junge 2009; Roosta y Hamidpour 2011). El nitrógeno (N) está presente en diferentes formas en los sistemas acuapónicos, y se excreta como parte del metabolismo de las proteínas de los animales acuáticos cultivados (Rakocy et al. 2006; Roosta y Hamidpour 2011; Tyson et al. 2011) después de lo cual ingresa al ciclo del nitrógeno en el medio acuático integrado. (El nitrógeno se analiza en detalle en el Capítulo 9 y, por lo tanto, se excluye de la presente discusión).

El uso de aditivos especializados en piensos para acuicultura puede contribuir al desarrollo de alimentos acuáticos a medida específicamente para acuaponía, proporcionando nutrientes adicionales a los animales y / o plantas acuáticas cultivados, o ajustando la proporción de nutrientes. Los aditivos para piensos acuícolas son diversos, con una amplia gama de funciones y mecanismos de trabajo. Las funciones pueden ser nutritivas y no nutritivas, y los aditivos pueden dirigirse hacia la acción en los alimentos o hacia los procesos fisiológicos de los animales acuáticos cultivados (Encarnação 2016). Para los propósitos de este capítulo, se hace hincapié en tres tipos específicos de aditivos que podrían ayudar a la confección de dietas acuapónicas: (1) suplementos minerales agregados directamente a los alimentos, (2) minerales que se agregan casualmente como parte de aditivos que

sirven para un propósito no mineral y (3) aditivos que hacen que los minerales, que ya están presentes en los alimentos, estén más disponibles para los animales acuáticos y / o plantas cultivados en sistemas acuapónicos.

1. Suplementación mineral directa en piensos acuapónicos

Complementar los minerales directamente en las dietas de acuicultura utilizadas en los sistemas de acuaponía es un método potencial para aumentar la cantidad de minerales excretados por los animales cultivados o para agregar minerales específicos requeridos por las plantas en los sistemas de acuaponía. Los minerales se agregan rutinariamente en forma de premezclas minerales a las dietas de acuicultura, para proporcionar a los animales acuáticos cultivados los elementos esenciales necesarios para el crecimiento y el desarrollo (Ng et al. 2001; NRC 2011). Cualquier mineral no absorbido por el pescado durante la digestión se excreta, y si está en forma soluble (principalmente iónica) en el sistema acuapónico, está disponible para la absorción de la planta (Tyson et al. 2011; Goddek et al. 2015). No está claro qué tan factible sería ese enfoque, ya que existe poca información sobre la eficacia de agregar suplementos minerales a los alimentos acuícolas con el propósito de mejorar la producción de plantas acuapónicas.

En general, los requerimientos minerales y el metabolismo en la acuicultura son poco conocidos en comparación con la producción de animales terrestres y, por lo tanto, la viabilidad de este enfoque no está bien descrita. Las posibles ventajas de este enfoque serían que podría ser una intervención bastante simple para mejorar el rendimiento general del sistema, podría permitir la suplementación de una amplia gama de nutrientes y es probable que tenga un costo relativamente bajo. Sin embargo, aún se requiere una investigación sustancial para evitar posibles dificultades importantes que puedan surgir. Uno de estos centros se centra en el hecho de que los minerales suplementados destinados a las plantas primero deben pasar por el tracto digestivo de los animales acuáticos cultivados y estos podrían ser absorbidos total o parcialmente durante este paso. Esto podría conducir a la acumulación no deseada de minerales en los animales acuáticos, o interferencia en la absorción de nutrientes intestinales normales y / o procesos fisiológicos (Oliva-Teles 2012). Pueden ocurrir interacciones significativas entre los minerales de la dieta en las dietas de acuicultura (Davis y Gatlin 1996), y estos deben determinarse antes de que se pueda emplear la suplementación mineral directa en las dietas acuaponicas. Otros efectos potenciales pueden incluir una estructura física alterada y características quimio sensoriales de los alimentos, que a su vez podrían afectar la palatabilidad de los alimentos. Claramente, todavía se necesita una investigación sustancial antes de que se pueda adoptar este método de

adaptar los alimentos para acuaponía.

2. Adición coincidente de minerales a través de aditivos para piensos
Ciertas clases de aditivos alimentarios se agregan a los alimentos acuícolas en forma de compuestos iónicos y donde solo uno de los iones contribuye a la actividad prevista. El otro ion se considera una adición coincidente e inevitable al alimento acuático y, a menudo, no se considera en ninguna investigación de acuicultura. Un ejemplo específico de una clase de aditivos alimenticios de uso frecuente son las sales de ácidos orgánicos, donde el ingrediente activo previsto en la alimentación acuícola es el anión de un ácido orgánico (por ejemplo, formiato, acetato, butirato o lactato) y el catión acompañante es a menudo ignorado en la nutrición de los animales cultivados. Por lo tanto, si el catión acompañante se elige a propósito para ser un nutriente macro o micro vegetal importante, existe la posibilidad de que los animales cultivados puedan excretarlo en el agua del sistema y estar disponible para su absorción por las plantas.

Los ácidos orgánicos de cadena corta y sus sales se han hecho bien conocidos y se usan a menudo en aditivos para piensos tanto en nutrición de animales terrestres como en acuicultura, donde los compuestos se emplean como potenciadores del rendimiento y agentes para mejorar la resistencia a las enfermedades. Estos compuestos pueden tener diferentes mecanismos de funcionamiento, que incluyen actuar como antimicrobianos, antibióticos o promotores del crecimiento, mejorar la digestibilidad y utilización de nutrientes y actuar como fuente de energía directamente metabolizable (Partanen y Mroz 1999; Lückstädt 2008; Ng y Koh 2017). Los ácidos orgánicos nativos o sus sales se pueden utilizar en las dietas de acuicultura, pero los fabricantes suelen preferir las formas de sal de los compuestos, ya que son menos corrosivos para los equipos de fabricación de piensos, son menos picantes y están disponibles en forma sólida (en polvo). que simplifica la adición al pienso formulado durante la fabricación (Encarnação 2016; Ng and Koh 2017). Para una revisión exhaustiva sobre el uso de ácidos orgánicos y sus sales en la acuicultura, los lectores deben consultar el trabajo de Ng y Koh (2017).

El empleo de sales de ácidos orgánicos en acuaponía tiene el potencial de tener beneficios dobles en el sistema, donde el anión podría mejorar el rendimiento y la resistencia a las enfermedades de los animales acuáticos cultivados, mientras que el catión (por ejemplo, el potasio) podría aumentar la cantidad de nutrientes esenciales de las plantas excretados. La ventaja potencial de este enfoque es que los niveles de inclusión en la dieta de sales de ácidos orgánicos pueden ser relativamente altos para un aditivo para piensos, y la investigación informa regularmente la inclusión total de

sales de ácidos orgánicos de hasta un 2% en peso (Encarnação 2016), aunque los fabricantes comerciales tienden a recomendar niveles más bajos de aproximadamente 0.15–0.5% (Ng y Koh 2017). El catión de las sales de ácidos orgánicos podría constituir una proporción significativa del peso total de la sal, y como se alimentan diariamente a los animales cultivados, podrían contribuir con una cantidad significativa de nutrientes a las plantas en un sistema acuapónico en el transcurso de una temporada de crecimiento. Actualmente no hay disponible ninguna investigación publicada que informe sobre los hallazgos de esta línea de investigación y, al igual que con la suplementación directa de minerales para los alimentos acuapónicos, este enfoque debe ser validado a través de investigaciones futuras para determinar el destino de los cationes agregados como parte de las sales de ácidos orgánicos (si son excretados o absorbidos por los animales acuáticos), y si hay alguna interacción con minerales o nutrientes. Sin embargo, sigue siendo una emocionante vía de investigación futura.

3. Aditivos alimenticios que hacen que los nutrientes sean más biodisponibles para las plantas

Se utilizan cantidades crecientes de ingredientes vegetales en alimentos acuícolas formulados, sin embargo, los minerales de las materias primas vegetales son menos biodisponibles para los animales acuáticos cultivados, principalmente debido a la presencia de factores anti nutricionales en los ingredientes dietéticos a base de plantas (Naylor et al. 2009; Kumar et al. 2012; Prabhu et al.2016). Esto significa que una mayor proporción de minerales se excreta en las heces en forma unida, lo que requiere "liberación" antes de estar disponible para la absorción de la planta. Un ejemplo típico es el fósforo orgánico que se produce como fitato, que puede unirse a otros minerales para formar compuestos insolubles, donde se requiere acción microbiana en el medio ambiente antes de que el fósforo se libere como fosfato soluble disponible en la planta (Kumar et al. 2012). El uso de enzimas exógenas en dietas acuapónicas adaptadas podría contribuir potencialmente a liberar una mayor cantidad de nutrientes de los alimentos acuícolas de alto contenido vegetal para la nutrición animal y vegetal en los sistemas acuaponicos. Las enzimas más utilizadas en los alimentos acuícolas son las proteasas, los carbohidratos y las fitasas, tanto para mejorar la digestión de nutrientes como para degradar compuestos anti nutricionales como el fitato (Encarnação 2016), lo que puede dar como resultado la liberación de nutrientes adicionales de los alimentos acuícolas. Aunque se sabe que la suplementación con enzimas exógenas conduce a una mejor utilización de nutrientes en los animales cultivados, no está claro si los nutrientes adicionales se excretarían en forma disponible para las plantas, evitando así un paso de remineralización por separado en los sistemas acuapónicos (véase el Capítulo 10).

Además, las interacciones entre enzimas exógenas y nutrientes en diferentes partes del tracto digestivo son posibles (Kumar et al. 2012), lo que tendrá implicaciones adicionales para las cantidades de nutrientes excretadas para el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, también se requiere más investigación para determinar la utilidad de las enzimas exógenas específicamente para su uso en alimentos acuapónicos.

13.4 RITMOS FISIOLÓGICOS: COMBINACIÓN DE PECES Y PLANTAS NUTRICIÓN

El diseño de alimentos para peces es crucial en acuaponía porque el alimento para peces es el aporte único o al menos el principal de nutrientes tanto para animales (macronutrientes) como para plantas (minerales) (Fig. 13.3).

El nitrógeno se introduce en el sistema acuapónico a través de la proteína en el alimento para peces que se metaboliza por los peces y se excreta en forma de amoníaco. La integración de la recirculación de la acuicultura con la hidroponía puede reducir la descarga de nutrientes no deseados al medio ambiente, así como generar ganancias. En un estudio económico temprano, la eliminación de fósforo en un sistema hidropónico integrado de trucha y lechuga / albahaca resultó ser un ahorro de costos (Adler et al. 2000). La integración de las tasas de alimentación de peces también es primordial para cumplir con los requerimientos nutricionales de las plantas. En realidad, los agricultores necesitan saber la cantidad de alimento utilizado en la unidad de acuicultura para calcular la cantidad de nutrientes que deben complementarse para promover el crecimiento de las plantas en la unidad hidropónica. Por ejemplo, en un sistema de acuaponia tilapia-fresa, la cantidad total de alimento requerida para producir iones (por ejemplo, NO3−, Ca2 +, H2PO4 y K +) para las plantas se calculó a diferentes densidades de peces, con un mejor resultado para la densidad de peces pequeños 2 kg de peces / m3 para reducir el costo de la suplementación con solución hidropónica (Villarroel et al. 2011).

Es bien sabido que las plantas tienen ritmos diarios y la ritmicidad circadiana en los movimientos de las hojas fue descrita por primera vez en plantas por De Mairan a principios del siglo XVIII (McClung 2006). Los ritmos circadianos en las plantas controlan todo, desde el momento de la floración hasta la nutrición de las plantas y, por lo tanto, estos ritmos deben tenerse en cuenta especialmente cuando se utiliza iluminación hortícola artificial. Los peces también están vinculados a ritmos diarios en la mayoría de las funciones fisiológicas, incluida la alimentación y la absorción de nutrien-

tes. No debería sorprender que los peces exhiban ritmos de alimentación porque la disponibilidad de alimentos y la aparición de depredadores son apenas constantes, pero se limitan a un momento particular del día / noche (López-Olmeda y Sánchez-Vázquez 2010). Por lo tanto, los peces deben alimentarse en el momento adecuado de acuerdo con sus ritmos de apetito: comidas programadas durante el día para las especies de peces diurnos y por la noche para los peces nocturnos. Es bien sabido que los peces muestran patrones diarios de desaminación de proteínas y desechos nitrogenados relacionados con su estado nutricional y sus ritmos de alimentación (Kaushik 1980). El tiempo de alimentación afecta la excreción de nitrógeno, como Gelineau et al. (1998) informaron que la producción de amoníaco y el catabolismo proteico fueron menores en los peces alimentados al amanecer (en fase con su ritmo de alimentación) que en los alimentados a medianoche (fuera de fase). Lo más interesante es que la excreción de urea muestra ritmicidad circadiana que persiste en peces hambrientos en condiciones constantes (Kajimura et al. 2002), revelando su origen endógeno. Además, la permeabilidad de la urea (determinada como el contenido de urea corporal después de la inmersión en una solución de urea) coincidió con la acrofase, es decir, el pico del ritmo de excreción diaria, lo que indica que la urea no penetra las células por difusión simple, pero existe un control circadiano. Las plantas también muestran ritmos diarios en la absorción de nitrógeno, como lo describieron Pearson y Steer (1977), quienes encontraron un patrón diario de absorción de nitrato y reductasa de nitrato en pimientos mantenido en un ambiente constante. La concentración de nitrato en las hojas de espinaca también aumentó durante la noche a medida que la tasa de absorción de nitrato por las raíces aumenta en ese momento (Steingrover et al. 1986). En acuaponía, la evidencia apunta a la necesidad de igualar los ritmos de excreción en peces y los ritmos de absorción de nutrientes en las plantas. Para optimizar el rendimiento y la rentabilidad de los sistemas de acuaponía, las dietas de pescado y los horarios de alimentación deben diseñarse cuidadosamente para proporcionar nutrientes en el nivel correcto y en el momento adecuado para complementar los peces y las plantas.

REFERENCIAS

Adler PR, Harper JK, Wade EM, Takeda F, Summerfelt ST (2000) Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. Int J Recirculat Aquacult 1:15–34

Alltech (2017) Alltech yearly survey 2017. https://go.alltech.com/alltech-feed-survey-2017

Ashraf S, Rania SM, Ehab REH (2013) Meat and bone meal as a potential source of phosphorus in plant-protein-based diets for Nile tilapia

(Oreochromis niloticus). Aquacult Intl 21:375–385
Béné C, Barange M, Subasinghe R, Pinstrup-Andersen P, Merino G, Hemre G-I, Williams M (2015) Feeding 9 billion by 2050 – putting fish back on the menú. Food Sec 7:261–274. https://doi.org/10.1007/s12571-015-0427-z
Betancor MB, Li K, Sprague M, Bardal T, Sayanova O, Usher S, Han L, Måsøval K, Torrissen O, Napier JA, Tocher DR, Olsen RO (2017) An oil containing EPA and DHA from transgenic Camelina sativa to replace marine fish oil in feeds for Atlantic salmon (Salmo salar L.): Effects on intestinal transcriptome, histology, tissue fatty acid profiles and plasma biochemistry. PLoS ONE 12(4):e0175415. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175415
Beveridge MCM, Thilsted SH, Phillips MJ, Metian M, Troell M, Hall SJ (2013) Meeting the food and nutrition needs of the poor. J Fish Biol:1067. https://doi.org/10.1111/jfb.12187
Bittsanszky A, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge R, Villarroel M, Kotzen B, Komives T (2016) Nutrient supply of plants in aquaponic systems. Ecocycles 2:17–20
Buzby KM, Lin L-S (2014) Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. Aquacult Eng 63:39–44. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.002.
Camacho-Rodríguez J, Macías-Sánchez MD, Cerón-García MC, Alarcón FJ, Molina-Grima E (2017) Microalgae as a potential ingredient for partial fish meal replacement in aquafeeds: nutrient stability under different storage conditions. J Appl Phycol. https://doi.org/10.1007/s10811-017-1281-5
Davidson J, Kenney PB, Barrows FT, Good C, Summerfelt ST (2018) Fillet quality and processing attributes of post-smolt Atlantic salmon, Salmo salar, fed a fishmeal-free diet and a fishmeal- based diet in recirculation aquaculture systems. J World Aquacult Soc 49:183–196. https://doi. org/10.1111/jwas.12452
Davis DA, Gatlin DM (1996) Dietary mineral requirement of fish and marine crustaceans. Rev Fish Sci 4:75–99. https://doi.org/10.1080/10641269609388579
Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. Aquac Eng 78:130–139
Douglas AE (2010) The symbiotic habit. Princeton University Press, Princeton Ebeling JM, Timmons MB (2012) Recirculating aquaculture systems. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture production systems. Wiley, Hoboken
EC (2009) Regulation (EC) No 1069/2009 of the European parliament and

of the council of 21 October 2009 laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing regulation (EC) No 1774/2002 (animal by-products regulation). Off J Eur Union L 300/1. https://doi.org/10.3000/17252555.L_2009.300.eng

Encarnação P (2016) Chapter 5: Functional feed additives in aquaculture feeds. In: Nates SF (ed) Aquafeed formulation. Academic, San Diego, pp 217–237

Endut A, Jusoh A, Ali N, Wan Nik WB (2011) Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. Desalinat Water Treat 32:422–430. https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2761

EU (2017) Commission Regulation (EU) 2017/893 of 24 May 2017 amending Annexes I and IV to Regulation (EC) No 999/2001 of the European Parliament and of the Council and Annexes X, XIV and XV to Commission Regulation (EU) No 142/2011 as regards the provisions on processed animal protein. Off J Eur Union L138/92. http://data.europa.eu/eli/reg/2017/893/oj

FAO (2014) The State of World Fisheries and Aquaculture. Food and Agricultural Organization, Rome, Italy

FAOSTAT (2015) Fish and fishery products – world apparent consumption statistics based on food balance sheets (1961–)

García-Romero J, Gines R, Izquierdo M, Robaina L (2014a) Marine and freshwater crab meals in diet for red porgy (*Pagrus pagrus*): effect on fillet fatty acid profile and flesh quality. Aquacul- ture 420–421:231–239. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.10.035

García-Romero J, Gines R, Vargas R, Izquierdo M, Robaina L (2014b) Marine and freshwater crab meals in diet for red porgy (Pagrus pagrus): Digestibility, ammonia-N excretion, phosphorus and calcium retention. Aquaculture 428–429:158–165. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.02.035

Gatlin DM, Barrows FT, Brown P, Dabrowski K, Gaylord TG, Hardy RW, Herman E, Hu GS, Krogdahl A, Nelson R, Rust M, Sealey W, Skonberg D, Souza EJ, Stone D, Wilson R, Wurtele E (2007) Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds; A review. Aquacult Res 38:551–579

Gelineau A, Medale F, Boujard T (1998) Effect of feeding time on postprandial nitrogen excretion and energy expenditure in rainbow trout. J Fish Biol 52:655–664

Gerile S, Pirhonen J (2017) Replacement of fishmeal with corn gluten meal in feeds for juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) does not affect oxygen consumption during forced swimming. Aquaculture 479:616–618. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.07.002

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199.

Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman KJ (2016) Navigating towards decoupled Aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8:303. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3930.0246

Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli HM, Grosse A, Eding EH, Bläser I, Reuterg M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquacult Eng 83:10–19. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.07.003

Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156

Hardy RW (2010) Utilization of plant proteins in fish diets: effects of global demand and supplies of fishmeal. Review article. Aquacult Res 41:770–776

Henry M, Gasco L, Piccolo G, Fountoulaki E (2015) Review on the use of insects in the diet of farmed fish: past and future. Anim Feed Sci Technol 203:1–22

Hertrampf JW, Piedad-Pascual F (2000) Handbook on ingredients for aquaculture feeds. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 624 pp

IFFO, The Marine Ingredients Association. http://www.iffo.net

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli H (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9(3):182. https://doi.org/10.3390/w9030182

Kajimura M, Iwata K, Numata H (2002) Diurnal nitrogen excretion rhythm of the functionally ureogenic gobiid fish Mugilogobius abei. Comp Biochem Physiol B 131:227–239

Kaushik SJ (1980) Influence of the nutritional status on the daily pattern of nitrogen excretion in the carp (Cyprinus carpio L.) and the rainbow trout (Salmo gairdneri R.). Reprod Nut Develop 20:1751–1765

Kaushik S (2017) Aquaculture deals with the production of all kinds of aquatic organisms through human intervention, 2017 meeting. International Council of Academies of Engineering and Technological Sciences (CAETS – http://www.caets.org). Madrid, 14–15 November 2017

Khakyzadeh V, Luque R, Zolfigol MA, Vahidian HR, Salehzadeh H, Moradi V, Soleymani AR, Moosavi-Zare AR, Xu K (2015) Waste to wealth: a sustainable aquaponic system based on residual nitrogen photoconversion. Royal Society of Chemistry 5:3917–3921.

https://doi.org/10.1039/C4RA15242E
Kingler D, Naylor R (2012) Searching for Solutions in Aquaculture: Charting a Sustainable Course. Anual Rev Environ Resour 37:247–276
Kloas W, Groß R, Baganz D, Graupner J, Monsees H, Schmidt U, Staaks G, Suhl J, Tschirner M, Wittstock B, Wuertz S, Zikova A, Rennert B (2015) A new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and reduce environmental impacts. Aquacult Environ Interact 7:179–192. https://doi.org/10.3354/aei00146
Koch JF, Rawlesb SD, Webster CD, Cummins V, Kobayashic Y, Thompson KR, Gannam AL, Twibell RG, Hyded NM (2016) Optimizing fish meal-free commercial diets for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Aquaculture 452:357–366. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.017
Kormas KA, Meziti A, Mente E, Fretzos A (2014) Dietary differences are reflected on the gut prokaryotic community structure of wild and commercially reared sea bream (Sparus aurata). Microbiology open. https://doi.org/10.1002/mbo3.202
Kobayashi M, Msangi S, Batka M, Vannuccini S, Dey MM, Anderson JL (2015) Fish to 2030: the role and opportunity for aquaculture. Aquacult Econ Manage 19:282–300. https://doi.org/10.1080/13657305.2015.994240
Krogdahl A, Penn M, Thorsen J, Refstie S, Bakke AM (2010) Important anti-nutrients in plant feedstuffs for aquaculture: An update on recent findings regarding responses in salmonids. Aquacult Res 41:333–344
Kumar V, Sinha AK, Makkar HPS, De Boeck G, Becker K (2012) Phytate and phytase in fish nutrition. J Anim Physiol Anim Nutr 96:335–364. https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01169.x
Lazzarotto, V., Médale, F., Larroquet, L. & Corraze, G. (2018). Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil in diets for rainbow trout (Oncorhynchus mykiss): Effects on growth, whole body fatty acids and intestinal and hepatic gene expression. PLoS One 13(1) https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190730
Le Gouvello, Raphaëla et François Simard (eds) (2017). Durabilité des alimments pour le poisson en aquaculture: Réflexions et recommandations sur les aspects technologiques, économique sociaux et environnementaux. Gland, Suisse: UICN, et Paris, France : Comité français de l'UICN. 296 pp
López-Olmeda JF, Sánchez-Vázquez FJ (2010) Feeding rhythms in fish: from behavioural to molecular approach. In: Kulczykowska E, Popek W. Kapoor BG (eds) Biological clock in fish. CRC Press, Enfield, pp 155–184
Love DC, Fry JP, Genello L, Hill ES, Frederick A, Li X, Semmens K (2014)

An International survey of aquaponics practitioners. PLoS One 9(7):e102662. https://doi.org/10.1371/journal. pone.0102662
Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015a) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023
Love DC, Uhl MS, Genello L (2015b) Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. Aquacult Eng 68:19–27
Lückstädt C (2008) The use of acidifiers in fish nutrition. CAB Rev Perspect Agricult Veterinary Sci Nutr Natur Resour 3:1–8
Makkar HPS, Ankers P (2014) Towards sustainable animal diets: a survey-based study. Anim Feed Sci Technol 198:309–322. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.09.018
Makkar HPS, Tran G, Heuzé V, Ankers P (2014) State-of-the-art on use of insects as animal feed. Anim Feed Sci Techn 197:1–33. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008
McClung CR (2006) Plant circadian rhythms. Plant Cell 18:792–803
Mente E, Gannon AT, Nikouli E, Hammer H, Kormas KA (2016) Gut microbial communities associated with the molting stages of the giant freshwater prawn Macrobrachium rosenbergii. Aquaculture 463:181–188
Msangi S, Kobayashi M, Batka M, Vannuccini S, Dey MM, Anderson JL (2013) Fish to 2030: prospects for fisheries and aquaculture. World Bank Report Number 83177-GLB. http://documents.worldbank.org/curated/en/458631468152376668/
Naylor RL, Hardy RW, Bureau DP, Chiu A, Elliott M, Farrell AP, Forster I, Gatlin DM, Goldburg RJ, Hua K, Nichols PD (2009) Feeding aquaculture in an era of finite resources. Proc Natl Acad Sci USA 106:15103–15110
Ng W-K, Koh C-B (2017) The utilization and mode of action of organic acids in the feeds of cultured aquatic animals. Rev Aquacult 9:342–368. https://doi.org/10.1111/raq.12141
Ng W-K, Ang L-P, Liew F-L (2001) An evaluation of mineral supplementation of fish meal-based diets for African catfish. Aquacult Int 9:277–282
NRC. N.R.C (2011) Nutrient requirements of fish and shrimp. The National Academies Press, Washington, District Columbia
Oliva-Teles A (2012) Nutrition and health of aquaculture fish. J Fish Dis 35:83–108. https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2011.01333.x
Pahlow M, Oel PR, Mekonnen MM, Hoekstra AY (2015) Increasing pressure on freshwater resources due to terrestrial feed ingredients for aquaculture production. Sci Total Environ 536:847–857.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.124
Palm HW, Seidemann R, Wehofsky S, Knaus U (2014) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic system. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. AACL Bioflux 7:20–32
Partanen KH, Mroz Z (1999) Organic acids for performance enhancement in pig diets. Nutr Res Rev 12:117–145
Pearson CJ, Steer BT (1977) Daily changes in nitrate uptake and metabolism in *Capsicum annuum*. Planta 137(2):107–112. https://doi.org/10.1007/BF00387546
Prabhu PAJ, Schrama JW, Kaushik SJ (2016) Mineral requirements of fish: a systematic review. Rev Aquacult 8:172–219
Rakocy JE, Shultz RC, Bailey DS, Thoman ES (2004) Aquaponic production of tilapia and basil: comparing a batch and staggered cropping system. Acta Hortic 648:63–69. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.648.8
Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center, pp 1–16
Robaina L, Izquierdo MS, Moyano FJ, Socorro J, Vergara JM, Montero D (1998) Increase of the dietary n-3/n-6 fatty acid ratio and addition of phosphorus improves liver histological alterations induced by feeding diets containing soybean meal to gilthead seabream, Sparus aurata. Aquaculture 161:281–293
Robaina L, Corraze G, Aguirre P, Blanc D, Melcion JP, Kaushik S (1999) Digestibility, postpran- dial ammonia excretion and selected plasma metabolites in European sea bass (Dicentrarchus labrax) fed pelleted or extruded diets with or without wheat gluten. Aquaculture 179:45–56
Roosta HR, Hamidpour M (2011) Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. Scientia Horticulturae 129:396–402. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006
Shah MR, Giovanni Antonio Lutzu GA, Alam A, Sarker P, Chowdhury MAK, Parsaeimehr A, Liang Y, Daroch M (2018) Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. J Appl Phycol 30:197–213. https://doi.org/10.1007/s10811-017-1234-z
Staples D, Funge-Smith S (2009) Ecosystem approach to fisheries and aquaculture: Implementing the FAO Code of Conduct for Responsible Fisheries. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand. RAP Publication 2009/11, 48 pp
Steingrover E, Ratering P, Siesling J (1986) Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light inten-

sity. Physiol Plantarum 66:555–556
Suomela JP, Tarvainen M, Kallio H, Airaksinen S (2017) Fish oil finishing diet maintains optimal n-3 long-chain fatty acid content in European whitefish (*Coregonus lavaretus*). Lipids 52:849–855. https://doi.org/10.1007/s11745-017-4290-x
Tacon AGJ (1987) The nutrition and feeding of farmed fish and shrimp - a training manual. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, Italy
Tacon AGJ, Metian M (2008) Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects. Aquaculture 285:146–158. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015
Tacon AGJ, Metian M (2015) Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. Rev Fish Sci Aquacult 23(1):1–10. https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209
Tacon AGJ, Hasan MR, Metian M (2011) Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans: trends and prospects. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper no. 564. FAO, Rome, 87 pp
Terova G, Robaina LE, Izquierdo MS, Cattaneo AG, Molinari S, Bernardini G, Saroglia M (2013) PepT1 mRNA expression levels in sea bream (Sparus aurata) fed different plant protein sources. Springer Plus 2:17. https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-17
Thilsted SH, Thorne-Lyman A, Webb P, Bogard JR, Subasinghe R, Phillips MJ, Allison EH (2016) Sustaining healthy diets: The role of capture fisheries and aquaculture for improving nutrition in the post-2015 era. Food Policy 61:126–131. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.02.005
Torrecillas S, Robaina L, Caballero MJ, Montero D, Calandra G, Mompel D, Karalazos V, Sadasivam K, Izquierdo M (2017) Combined replacement of fishmeal and fish oil in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*): production performance, tissue composition and liver morphology. Aquaculture 474. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.03.031
Treadwell D, Taber S, Tyson R, Simonne E (2010) HS1163: Foliar-applied micronutrients in aquaponics: s guide to use and sourcing, IFAS Extension. University of Florida
Tveterås S, Asche F, Bellemare MF, Smith MD, Guttormsen AG, Lem A, Lien K, Vannuccini S (2012) Fish is food – the FAO's fish price index. PLoS ONE 7:e36731
Tyson RV, Treadwell DD, Simonne EH (2011) Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. HortTechnology 21:6–13

Van Huis A, Oonincx DGAB (2017) The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. Agron Sustain Dev 37:43. https://doi.org/10.1007/s13593-017-0452-8

Villarroel M, Alvariño JMR, Duran JM (2011) Aquaponics: integrating fish feeding rates and ion waste production for strawberry hydroponics. Spanish J Agricult Res 9:537–545

White C (2017) Algae-based aquafeed firms breaking down barriers for fish-free feeds. https://www.seafoodsource.com/news/aquaculture/algae-based-aquafeed-firms-breaking-down-bar riers-for-fish-free-feeds

Ytrestøy T, Aas TS, Åsgård T (2015) Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (Salmo salar) in Norway. Aquaculture 448:365–374. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.06.023

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 14

PATÓGENOS DE PLANTAS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL EN ACUAPONÍA

Gilles Stouvenakers, Peter Dapprich, Sebastien Massart, and M. Haïssam Jijakli

Capítulo 14

PATÓGENOS DE PLANTAS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL EN ACUAPONÍA

Gilles Stouvenakers; Peter Dapprich; Sebastien Massart; and M. Haïssam Jijakli*

Resumen

Entre la diversidad de enfermedades de plantas que ocurren en acuaponia, los patógenos transmitidos por el suelo, como *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp. y *Pythium* spp., son los causantes de diversos problemas debido a su preferencia por las condiciones del ambiente húmedo / acuático. *Phytophthora* spp. y *Pythium* spp. que pertenecen a los pseudohongos Oomycetes requieren una mayor atención debido a su forma móvil de dispersión, las llamadas zoosporas que pueden moverse libremente y activamente en agua. En acuaponia articulada, los métodos curativos siguen siendo limitados debido a la posible toxicidad de pesticidas y agentes químicos para peces y bacterias benéficas (por ejemplo, bacterias nitrificantes del biofiltro). Además, el desarrollo de agentes de biocontrol para uso en acuaponia todavía está en sus inicios. En consecuencia, las formas de controlar la infección inicial y la progresión de una enfermedad se basan principalmente en acciones preventivas y tratamientos físicos del agua. Sin embargo, la acción inhibitoria (supresión) podría ocurrir en el ambiente acuapónico considerando los trabajos recientes y la actividad supresora ya destacada en hidroponía. Además, el agua acuapónica contiene materia orgánica que podría promover el establecimiento y el crecimiento de bacterias heterotróficas en el sistema o incluso mejorar directamente el crecimiento y la viabilidad de las plantas. Con respecto a la hidroponía orgánica (es decir, el uso de fertilización orgánica y medios orgánicos de plantas), estas bacterias podrían actuar como agentes antagonistas o como inductores de defensa de las plantas para protegerlas

G. Stouvenakers (*) S. Massart M. H. Jijakli
Integrated and Urban Plant Pathology Laboratory, Université de Liège, Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgium
E-mail: g.stouvenakers@uliege.be; sebastien.massart@uliege.be; mh.jijakli@uliege.be

P. Dapprich
Department of Agriculture, Fachhochschule Südwestfalen University of Applied Sciences, Soest, Germany
E-mail: dapprich.peter@fh-swf.de

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_14

de enfermedades. En el futuro, se debe aumentar la investigación sobre la capacidad supresora de la enfermedad del biotopo acuaponico, así como el aislamiento, la caracterización y la formulación de antagonistas de patógenos de plantas microbianas. Finalmente, un buen conocimiento en la identificación rápida de patógenos, combinado con métodos de control y monitoreo de enfermedades, como se recomienda en el manejo integrado de plagas de plantas, es la clave para un control eficiente de enfermedades de plantas en acuaponia.

Palabras clave: Patógenos; Hongos; Acuaponia; Biotopo; Supresivo; Manejo de plagas de plantas; Agentes de biocontrol

14.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los sistemas acuapónicos son el núcleo de numerosos esfuerzos de investigación que tienen como objetivo comprender mejor estos sistemas y responder a los nuevos desafíos de la sostenibilidad de la producción de alimentos (Goddek et al. 2015; Villarroel et al. 2016). El número acumulado de publicaciones que mencionan "acuaponía" o términos derivados en el título pasó de 12 a principios de 2008 a 215 en 2018 (resultados de investigación de la base de datos Scopus de enero de 2018). A pesar de este número creciente de documentos y la gran área de temas de estudio que cubren, todavía falta un punto crítico, a saber, el manejo de plagas de plantas (Stouvenakers et al.2017). De acuerdo con una encuesta realizada a miembros de EU Aquaponic Hub, solo el 40% de los profesionales tienen algunas nociones sobre las plagas y el control de estas en plantas (Villarroel et al.2016).

En acuaponía, las enfermedades pueden ser similares a las que se encuentran en los sistemas hidropónicos bajo estructuras de invernadero. Entre los patógenos más problemáticos, en términos de propagación, se encuentran hongos hidrofílicos o protistas similares a hongos que son responsables de las enfermedades de la raíz o el collar. Para considerar el control de patógenos de plantas en acuaponia, en primer lugar, es importante diferenciar entre sistemas acoplados y desacoplados. Los sistemas desacoplados permiten la desconexión entre el agua de los peces y el compartimento del cultivo (ver Cap. 8). Esta separación permite la optimización y un mejor control de diferentes parámetros (por ejemplo, temperatura, composición mineral u orgánica y pH) en cada compartimento (Goddek et al.2016; Monsees et al.2017). Además, si el agua de la unidad de cultivo no vuelve a la parte de los peces, la aplicación de tratamientos fitosanitarios (por ejemplo, pesticidas, bioplaguicidas y agentes de desinfección química) podría permitirse aquí. Los sistemas

acoplados se construyen en un circuito donde el agua recircula en todas las partes del sistema (véanse los capítulos 5 y 7). Sin embargo, en sistemas acoplados, el control de plagas de plantas es más difícil debido a la presencia de peces y microorganismos beneficiosos que transforman las heces de los peces en nutrientes para las plantas. Su existencia limita o excluye la aplicación de agentes desinfectantes y tratamientos químicos ya disponibles. Además, no se han desarrollado pesticidas ni biopesticidas específicamente para acuaponía (Rakocy et al. 2006; Rakocy 2012; Somerville et al. 2014; Bittsanszky et al. 2015; Nemethy et al.2016; Sirakov et al. 2016). En consecuencia, las medidas de control se basan principalmente en prácticas físicas no curativas (ver Sección 14.3.1) (Nemethy et al. 2016; Stouvenakers et al. 2017).

Por otro lado, estudios recientes destacan que la producción de plantas de acuaponía ofrece rendimientos similares en comparación con la hidroponía, aunque las concentraciones de nutrientes de las plantas minerales son más bajas en agua acuapónica. Además, cuando el agua acuapónica se complementa con algunos minerales para alcanzar concentraciones hidropónicas de elementos nutritivos minerales, se pueden observar rendimientos aún mejores (Pantanella et al. 2010; Pantanella et al. 2015; Delaide et al. 2016; Saha et al. 2016; Anderson et al. 2017; Wielgosz y col. 2017; Goddek y Vermeulen 2018). Además, algunas observaciones informales de profesionales en acuaponía y dos estudios científicos recientes (Gravel et al. 2015; Sirakov et al. 2016) informan la posible presencia de compuestos beneficiosos y / o microorganismos en el agua que podrían desempeñar un papel en la bioestimulación y / o tienen actividad antagonista (es decir, inhibidora) contra patógenos de plantas.

La bioestimulación se define como la mejora de los rasgos de calidad de la planta y la tolerancia de la planta contra el estrés abiótico utilizando cualquier microorganismo o sustancia.

Con respecto a estos aspectos, este capítulo tiene dos objetivos principales. El primero es hacer una revisión de los microorganismos involucrados en los sistemas acuaponicos con un enfoque especial en los microorganismos patógenos y beneficiosos para las plantas. También se considerarán los factores que influyen en estos microorganismos (por ejemplo, materia orgánica). El segundo es revisar los métodos disponibles y las posibilidades futuras en el control de enfermedades de las plantas.

14.2 MICROORGANISMOS EN ACUAPONÍA

Los microorganismos están presentes en todo el sistema de acuaponía y

juegan un papel clave en el sistema. En consecuencia, se encuentran en los peces, en la filtración (mecánica y biológica) y en las partes del cultivo. Comúnmente, la caracterización de la microbiota (es decir, microorganismos de un entorno particular) se realiza en agua circulante, perifiton, plantas (rizosfera, filosfera y superficie de la fruta), en el biofiltro, en el alimento, intestino y heces de los peces. Hasta ahora, en acuaponia, la mayor parte de la investigación microbiana se ha centrado en las bacterias nitrificantes (Schmautz et al. 2017). Por lo tanto, la tendencia actual es caracterizar los microorganismos en todos los compartimentos del sistema utilizando tecnologías modernas de secuenciación. Schmautz y col. (2017) identificaron la composición microbiana en diferentes partes del sistema, mientras que Munguia-Fragozo et al. (2015) brindan perspectivas sobre cómo caracterizar la microbiota en acuaponía desde un punto de vista taxonómico y funcional mediante el uso de tecnologías de vanguardia. En las siguientes subsecciones, solo se centrará en los microorganismos que interactúan con las plantas en sistemas acuapónicos organizados en microorganismos beneficiosos para las plantas y microorganismos patógenos de las plantas.

14.2.1 Patógenos vegetales

Los agentes patógenos de las plantas que se encuentran en los sistemas acuapónicos son teóricamente los que se encuentran comúnmente en los sistemas sin suelo. Una particularidad del cultivo de plantas acuapónicas e hidropónicas es la presencia continua de agua en el sistema. Este ambiente húmedo / acuático se adapta a casi todos los hongos o bacterias patógenos de las plantas. Para los patógenos de la raíz, algunos están especialmente bien adaptados a estas condiciones, como los pseudohongos pertenecientes a los taxones de *Oomycetes* (por ejemplo, enfermedades de pudrición de la raíz causadas por *Pythium* spp. y *Phytophthora* spp.) Que pueden producir una forma móvil de diseminación llamada zoosporas. Estas zoosporas pueden moverse activamente en el agua y, por lo tanto, pueden extenderse por todo el sistema extremadamente rápido. Una vez que la planta este infectada, la enfermedad puede propagarse rápidamente por el sistema, especialmente debido a la recirculación del agua (Jarvis 1992; Hong y Moorman 2005; Sutton et al. 2006; Postma et al. 2008; Vallance et al. 2010; Rakocy 2012; Rosberg 2014; Somerville y col. 2014). Aunque los oomicetos están entre los patógenos más prevalentes detectados durante las enfermedades de la raíz, a menudo forman un complejo con otros patógenos. Algunas especies de *Fusarium* (con existencia de especies bien adaptadas al ambiente acuático) o especies de los géneros *Colletotrichum, Rhizoctonia* y *Thielaviopsis* se pueden encontrar como parte de estos complejos y

también pueden causar daños significativos por sí mismos (Paulitz y Bélanger 2001; Hong y Moorman 2005; Postma et al. 2008; Vallance et al. 2010). Otros géneros fúngicos como *Verticillium* y *Didymella*, pero también bacterias, como *Ralstonia, Xanthomonas, Clavibacter, Erwinia* y *Pseudomonas*, así como virus (p. Ej., Mosaico de tomate, mosaico de pepino, virus de manchas necróticas de melón, virus infeccioso de lechuga y necrosis del tabaco), pueden detectarse en hidroponía o agua de riego y causar daños a los vasos, tallos, hojas o frutos (Jarvis 1992; Hong y Moorman 2005). Sin embargo, tenga en cuenta que no todos los microorganismos detectados son perjudiciales o producen síntomas en el cultivo. Incluso las especies del mismo género pueden ser dañinas o beneficiosas (por ejemplo, *Fusarium*, *Phoma*, *Pseudomonas*). Los agentes patógenos mencionados anteriormente son principalmente patógenos relacionados con la recirculación del agua, pero también pueden identificarse en invernaderos. La Sección 14.2.2 muestra los resultados de la primera encuesta internacional sobre enfermedades de las plantas que ocurren específicamente en acuaponía, mientras que Jarvis (1992) y Albajes et al. (2002) dan una visión más amplia de la presencia de patógenos en las estructuras de invernadero.

En hidroponía o en sistemas de acuaponía, las plantas generalmente crecen en condiciones de invernadero optimizadas para la producción de plantas, especialmente para la producción a gran escala donde todos los parámetros ambientales son manejados por computadora (Albajes et al. 2002; Vallance y col. 2010; Somerville y col. 2014; Parvatha Reddy 2016). Sin embargo, las condiciones óptimas para la producción de plantas también pueden ser explotadas por los patógenos de las plantas. De hecho, estas estructuras generan condiciones cálidas, húmedas, sin viento y sin lluvia que pueden fomentar las enfermedades de las plantas si no se manejan correctamente (ibid.). Para contrarrestar esto, se deben hacer compromisos entre las condiciones óptimas de la planta y la prevención de enfermedades (ibid.). En el microclima del invernadero, un manejo inapropiado del déficit de presión de vapor puede conducir a la formación de una película o una gota de agua en la superficie de las plantas. Esto a menudo promueve el desarrollo de patógenos de plantas. Además, para maximizar el rendimiento en cultivos hidropónicos comerciales, algunos otros parámetros (por ejemplo, alta densidad de plantas, alta fertilización, para extender el período de producción) pueden mejorar la susceptibilidad de las plantas a desarrollar enfermedades (ibid.).

La pregunta ahora es saber por qué ruta se introduce el inóculo inicial (es decir, el primer paso en un ciclo epidemiológico) en el sistema. Los diferentes pasos en el ciclo epidemiológico de las enfermedades de las

plantas (EpC) se representan en la figura 14.1. En acuaponía, como en el cultivo hidropónico en invernadero, se puede considerar que la entrada de patógenos podría estar relacionada con el suministro de agua, la introducción de plantas o semillas infectadas, el material de crecimiento (por ejemplo, la reutilización de los medios), el intercambio de aire (transporte de polvo, Inóculo y partículas), insectos (vectores de enfermedades y transporte de partículas) y personal (herramientas y ropa) (Paulitz y Bélanger 2001; Albajes et al.2002; Hong y Moorman 2005; Sutton et al.2006; Parvatha Reddy 2016). Una vez que el inóculo está en contacto con la planta (paso 2 en la EpC), son posibles varios casos de infección (paso 3 en la EpC) (Lepoivre 2003):

–La relación patógeno-planta es incompatible (relación no huésped) y la enfermedad no se desarrolla.
– Existe una relación con el huésped, pero la planta no muestra síntomas (la planta es tolerante).
– El patógeno y la planta son compatibles, pero la respuesta de defensa es lo suficientemente fuerte como para inhibir la progresión de la enfermedad (la planta es resistente: interacción entre el gen de resistencia del huésped y el gen de avirulencia del patógeno).
– La planta es sensible (relación del huésped sin el gen para el reconocimiento del gen), y el patógeno infecta a la planta, pero los síntomas no son muy graves (paso 4 en la EpC).
– Y, por último, la planta es sensible y los síntomas de la enfermedad son visibles y graves. (paso 4 en la EpC).

Independientemente del grado de resistencia, algunas condiciones o factores ambientales pueden influir en la susceptibilidad de una planta a infectarse, ya sea debilitándola o promoviendo el crecimiento del patógeno de la planta (Colhoun 1973; Jarvis 1992; Cherif et al. 1997; Alhussaen 2006; Somerville et al.2014). Los principales factores ambientales que influyen en los agentes patógenos de las plantas y el desarrollo de enfermedades son la temperatura, la humedad relativa (HR) y la luz (ibid.). En hidroponía, las concentraciones de temperatura y oxígeno dentro de la solución nutritiva pueden constituir factores adicionales (Cherif et al. 1997; Alhussaen 2006; Somerville et al. 2014). Cada patógeno tiene su propia preferencia de condiciones ambientales que pueden variar durante su ciclo epidemiológico. Pero de manera general, la alta humedad y temperatura son favorables para la realización de pasos clave en el ciclo epidémico del patógeno, como la producción de esporas o la germinación de esporas (Fig. 14.1, paso 5 en la EpC) (Colhoun 1973; Jarvis 1992; Cherif et al. al.1997; Alhussaen 2006; Somerville et al.2014). Colhoun (1973) resume los efectos de los diversos factores que

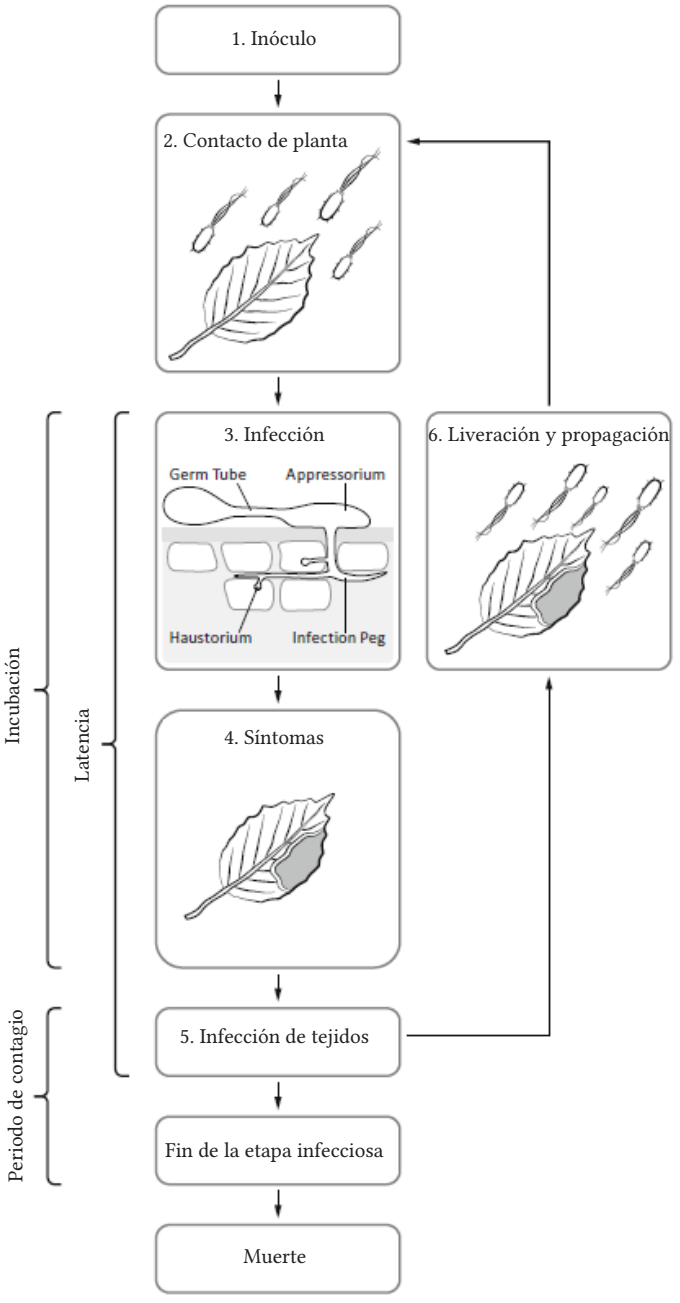


Fig. 14.1 Pasos básicos (1 to 6) en el ciclo epidemiologico de la enfermedad de la planta (EpC) según Lepoivre (2003). (1) Llegada del inoculo patógeno, (2) contacto con la planta huésped, (3) penetración de tejidos y proceso de infección por el patógeno, (4) desarrollo de síntomas, (5) tejidos de la planta que se vuelven infecciosos, (6) Liberación y propagación de formas infecciosas de la planta.

promueven las enfermedades de las plantas en el suelo, mientras que la Tabla 14.1 muestra los factores más específicos o adicionales que pueden fomentar el desarrollo de patógenos de las plantas vinculados a las condiciones de invernadero acuapónico. En el ciclo epidemiológico, una vez que se alcanza la etapa infecciosa (paso 5 en la EpC), los patógenos pueden propagarse de varias maneras (Fig. 14.1, paso 6 en la EpC) e infectar otras plantas. Como se explicó anteriormente, los patógenos de las raíces que pertenecen a los taxones de Oomycetes pueden propagarse activamente en el agua de recirculación mediante la liberación de zoosporas (Alhussaen 2006; Sutton y col. 2006). Para otros hongos, bacterias y virus responsables de enfermedades de la raíz o aéreas, la dispersión del agente causal puede ocurrir por propagación de material infectado, heridas mecánicas, herramientas infectadas, vectores (por ejemplo, insectos) y partículas (por ejemplo, esporas y propágulos), expulsión o transporte permitido por sequía, corrientes de aire o salpicaduras de agua (Albajes et al. 2002; Lepoivre 200314.2.2 Encuesta Sobre Enfermedades de Plantas Acuapónicas

Durante enero de 2018, se realizó la primera encuesta internacional sobre enfermedades de las plantas entre los miembros practicantes de acuaponía del COST FA1305, la Asociación Americana de Acuaponía y el Centro de Acuaponía de la UE. Veintiocho respuestas fueron recibidas que describen 32 sistemas acuapónicos de todo el mundo (UE, 21; América del Norte, 5; América del Sur, 1; África, 4; Asia, 1). El primer hallazgo fue la pequeña tasa de respuesta. Una de las posibles explicaciones de la renuencia a responder al cuestionario fue que los profesionales no se sentían capaces de comunicarse sobre los patógenos de las plantas debido a la falta de conocimiento sobre este tema. Esto ya se había observado en las encuestas de Love et al. (2015) y Villarroel et al. (2016)

La información clave obtenida de la encuesta es:

- 84,4% de los practicantes observan enfermedades en su sistema.
- 78,1% no logran identificar el agente causal de una enfermedad.
- 34,4% no aplican medidas de control de enfermedades.
- 34,4% usan tratamientos físicos o químicos del agua.
- 6,2% usan pesticidas o bioplaguicidas en el sistema acuapónico acoplado contra los patógenos de las plantas.

Estos resultados respaldan los argumentos anteriores que dicen que las plantas acuapónicas contraen enfermedades. Sin embargo, los profesionales padecen una falta de conocimiento sobre los agentes patógenos de las plantas y las medidas de control de enfermedades que se

usan realmente se basan esencialmente en acciones no curativas (90.5% de los casos).

En la encuesta, se proporcionó una lista de patógenos de plantas que ocurren en su sistema acuapónico. La tabla 14.2 muestra los resultados de esta identificación. Para remediar la falta de experiencia del profesional sobre el diagnóstico de enfermedades de las plantas, se envió una segunda versión de la encuesta con el objetivo de identificar los síntomas sin vinculación del nombre de la enfermedad (Tabla 14.3). La Tabla 14.2 identifica principalmente enfermedades con síntomas específicos, es decir, síntomas que pueden estar directamente relacionados con un patógeno de la planta. Es el caso de Botrytis cinerea y su típico moho gris, mildiu polvoriento (géneros *Erysiphe* y *Podosphaera* en la tabla) y su micelio / conidios polvorientos blancos, y finalmente *Sclerotinia spp.* y su producción de esclerocios. La presencia de 3 fitopatólogos en los encuestados amplía la lista, con la identificación de algunos patógenos de la raíz (por ejemplo, *Pythium spp.*). Los síntomas generales que no son lo suficientemente específicos como para estar directamente relacionados con un patógeno sin una verificación adicional (ver diagnóstico en la Sección 14.3) se encuentran en consecuencia en la Tabla 14.3. Pero es importante resaltar que la mayoría de los síntomas observados en esta tabla también podrían ser consecuencia del estrés abiótico. La clorosis foliar es uno de los ejemplos más explícitos porque puede relacionarse con una gran cantidad de patógenos (p. Ej., Para lechugas: *Pythium spp.*, *Bremia lactucae*, *Sclerotinia spp.*, Virus de la remolacha del oeste de los amarillos), a condiciones ambientales (p. Ej., Exceso de temperatura) y a las deficiencias minerales (nitrógeno, magnesio, potasio, calcio, azufre, hierro, cobre, boro, zinc, molibdeno) (Lepoivre 2003; Resh 2013).

14.2.3 Microorganismos beneficiosos en acuaponía: las posibilidades

Como se explicó en la introducción, varias publicaciones se centraron en las bacterias involucradas en el ciclo del nitrógeno, mientras que otras ya enfatizan la posible presencia de microorganismos beneficiosos que interactúan con patógenos y / o plantas (Rakocy 2012; Gravel y col. 2015; Sirakov y col. 2016). Esta sección revisa el potencial de los microorganismos beneficiosos para las plantas que participan en la acuaponía y sus modos de acción.

Sirakov y col. (2016) seleccionaron bacterias antagonistas contra *Pythium ultimum* aisladas de un sistema acuapónico. Entre los 964 aislamientos probados, 86 mostraron un fuerte efecto inhibitorio sobre *Pythium*

Tabla 14.1 Agregar factores que fomentan el desarrollo de patógenos de plantas bajo la estructura de invernadero acuapónico en comparación con el cultivo clásico de invernadero.

Factor de promoción	Luchando por	Causas	Referencias
Técnica de película de nutrientes (NFT), técnica de flujo profundo (DFT)	*Pythium* spp., *Fusarium* spp.	Fácil propagación por recirculación de agua; posibilidad de contaminación posterior después de una etapa de desinfección; pobre contenido en oxígeno en la solución nutritiva	Koohakan et al. (2004) and Vallance (2010 et al.)
Medios inorgánicos (por ejemplo, lana de roca)	Mayor contenido en bacterias. (sin información sobre su posible Patogenicidad)	Compuestos orgánicos no disponibles en los medios	Khalil and Alsanius(2001), Koohakan et al. (2004), Vallance et al. (2010)
Medios orgánicos (por ejemplo, fibra de coco y turba)	Mayor contenido en hongos; mayor contenido en *Fusarium* spp. para la fibra de coco	Compuestos orgánicos disponibles en los medios	Koohakan et al. (2004), Khalil et al. (2009), and Vallance et al. (2010)
Medios con alto contenido de agua y bajo contenido de oxígeno (por ejemplo, lana de roca)	*Pythium* spp.	Movilidad de zoosporas; estrés vegetal	Van Der Gaag and Wever (2005), Vallance et al. (2010), and Khalil and Alsanius (2011)
Medios que permiten poco movimiento de agua (por ejemplo, lana de roca)	*Pythium* spp.	Mejor condición para la dispersión de esporas de zoológico y el movimiento de quimiotaxis; sin pérdida de flagelas zoosporas	Sutton et al. (2006)
Alta temperatura y baja concentración de OD en la solución nutritiva	*Pythium* spp.	Planta estresada y condición óptima para el crecimiento de *Pythium*	Cherif et al. (1997), Sutton et al. (2006), Vallance et al. (2010), and Rosberg (2014)
Alta densidad de la planta huésped y microclima resultante.	*Crecimiento de patógenos; propagación de enfermedades*	Planta estresada y condición óptima para el crecimiento de *Pythium*	Albajes et al. (2002) and Somerville et al. (2014)
Deficiencias, exceso o desequilibrio de macro / micronutrientes	*Hongos, virus y bacterias.*	Modificaciones fisiológicas de la planta (por ejemplo, acción sobre la respuesta de defensa, transpiración, integridad de las paredes celulares); modificaciones morfológicas de la planta (por ejemplo, mayor susceptibilidad a los patógenos, atracción de plagas); recursos nutricionales en tejidos del huésped para patógenos; acción directa sobre el ciclo de desarrollo de patógenos	Colhoun (1973), Snoeijers and Alejandro (2000), Mitchell et al. (2003), Dordas (2008), Veresoglou et al. (2013), Somerville et al. (2014), and Geary et al. (2015)

Tabla 14.2. Resultados de las primeras identificaciones de patógenos de plantas en acuaponía del análisis de la encuesta internacional de 2018 y de la literatura existente

Planta huésped	Fitopatógeno	Referencias o resultados de encuestas
Allium schoenoprasu	*Pythium sp.*[(b)]	Survey
Beta vulgaris (swiss chard)	*Erysiphe betae*[(a)]	Survey
Cucumis sativus	*Podosphaera xanthii*[(a)]	Survey
Fragaria spp.	*Botrytis cinerea*[(a)]	Survey
Lactuca sativa	*Botrytis cinerea*[(a)]	Survey
	Bremia lactucae[(a)]	Survey
	Fusarium sp.[(b)]	Survey
	Pythium dissotocum[(b)]	Rakocy (2012)
	Pythium myriotylum[(b)]	Rakocy (2012)
	Sclerotinia sp.[(a)]	Survey
Mentha spp.	*Pythium sp.*[(b)]	Survey
Nasturtium officinale	*Aspergillus sp.*[(a)]	Survey
Ocimum basilicum	*Alternaria sp.*[(a)]	Survey
	Botrytis cinerea[(a)]	Survey
	Pythium sp.[(b)]	Survey
	Sclerotinia sp.[(a)]	Survey
Pisum sativum	*Erysiphe pisi*[(a)]	Survey
Solanum lycopersicum	*Pseudomononas solanacearum*[(a)]	McMurty et al. (1990)
	Phytophthora infestans[(a)]	Survey

Los patógenos de las plantas identificados por síntomas en la parte aérea de la planta están anotados por (a) y en la parte raíz por (b) en el exponente

Tabla 14.3. Revisión de los síntomas que ocurren en acuaponía del análisis de la encuesta internacional de 2018

Síntomas	Especies de plantas
Clorosis foliar	*Allium schoenoprasum*[1], *Amaranthus viridis*[1], *Coriandrum sativum*[1], *Cucumis sativus*[1], *Ocimum basilicum*[6], *Lactuca sativa*[4], *Mentha spp.*[2], *Petroselinum crispum*[1], *Spinacia oleracea*[2], *Solanum lycopersicum*[1], *Fragaria spp.*[1]
Foliar necrosis Stem necrosis Collar necrosis	*Mentha spp.*[2], *Ocimum basilicum*[1], *Solanum lycopersicum*[1], *Ocimum basilicum*[1]
Foliar Mosaic	*Cucumis sativus*[1], *Mentha spp.*[1], *Ocimum basilicum*[1],
Foliar wilting	*Brassica oleracea Acephala group*[1], *Lactuca sativa*[1], *Mentha spp.*[1], *Cucumis sativus*[1], *Ocimum basilicum*[1], *Solanum lycopersicum*[1]
Foliar, stem and collar mould	*Allium schoenoprasum*[1], *Capsicum annuum*[1], *Cucumis sativus*[1], *Lactuca sativa*[2], *Mentha spp.*[2], *Ocimum basilicum*[4], *Solanum lycopersicum*[1]
Foliar spots	*Capsicum annuum*[1], *Cucumis sativus*[1], *Lactuca sativa*[2], *Mentha spp.*[1], *Ocimum basilicum*[5]
Damping off	*Spinacia oleracea*[1], *Ocimum basilicum*[1], *Solanum lycopersicum*[1], *seedlings in general*[5]
Crinkle	*Beta vulgaris* (swiss chard)[1], *Capsicum annuum*[1], *Lactuca sativa*[1], *Ocimum basilicum*[1]
Browning or decaying root	*Allium schoenoprasum*[1], *Amaranthus viridis*[1], *Beta vulgaris (swiss chard)*[1], *Coriandrum sativum*[1], *Lactuca sativa*[1], *Mentha spp.*[2], *Ocimum basilicum*[2], *Petroselinum crispum*[2], *Solanum lycopersicum*[1], *Spinacia oleracea*[1]

Los números en exponente representan la aparición del síntoma para una planta específica en un total de 32 sistemas acuapónicos revisados.

ultimum in vitro. Se deben realizar más investigaciones para identificar taxonómicamente estas bacterias y evaluar su potencial en condiciones in vivo. Los autores suponen que muchos de estos aislamientos pertenecen al género *Pseudomonas*. Schmautz y col. (2017) llegaron a la misma conclusión al identificar *Pseudomonas* spp. en la rizosfera de la lechuga. Las especies antagónicas del género *Pseudomonas* pudieron controlar los patógenos de las plantas en ambientes naturales (por ejemplo, en suelos supresores) mientras que esta acción también se ve afectada por las condiciones ambientales. Pueden proteger las plantas contra los patógenos, ya sea de forma activa o pasiva, provocando una respuesta de defensa de las plantas, desempeñando un papel en la promoción del crecimiento de las plantas, compitiendo con los patógenos por el espacio y los nutrientes (por ejemplo, la competencia del hierro mediante la liberación de sideróforos quelantes de hierro), y / o finalmente mediante la producción de antibióticos o metabolitos antifúngicos como los biosurfactantes (Arras y Arru 1997; Ganeshan y Kumar 2005; Haas y Défago 2005; Beneduzi et al. 2012; Narayanasamy 2013). Aunque Gravel et al. No identificaron microorganismos. (2015)), informan que los efluentes de pescado tienen la capacidad de estimular el crecimiento de las plantas, disminuir el crecimiento micelial de *Pythium ultimum* y *Pythium oxysporum* in vitro y reducir la colonización de la raíz del tomate por estos hongos. La información sobre la posible capacidad de protección natural de las plantas de la microbiota acuapónica es escasa, pero se puede prever el potencial de esta acción protectora con respecto a los diferentes elementos ya conocidos en hidroponía o en acuacultura recirculada. Un primer estudio se realizó en 1995 sobre acción supresora o supresividad promovida por microorganismos en cultivos sin suelo (McPherson et al. 1995). Supresividad en hidroponía, aquí definida por Postma et al. (2008)), se ha "referido a los casos en que (i) el patógeno no se establece o persiste; o (ii) establece, pero causa poco o ningún daño". La acción supresora de un entorno puede estar relacionada con el entorno abiótico (por ejemplo, pH y materia orgánica). Sin embargo, en la mayoría de las situaciones, se considera que está relacionado directa o indirectamente con la actividad de los microorganismos o sus metabolitos (James y Becker 2007). En cultivos sin suelo, Postma et al. Revisan la capacidad supresora mostrada por la solución de agua o los medios sin suelo. (2008) y Vallance et al. (2010) En estas revisiones, los microorganismos responsables de esta acción supresora no están claramente identificados. En contraste, los patógenos de plantas como *Phytophthora cryptogea, Pythium* spp., *Pythium aphanidermatum* y *Fusarium oxysporum f.sp.* Se describen exhaustivamente radicis-lycopersici controlados o suprimidos por l microbiota natural. En los diversos artículos revisados por Postma et al. (2008) y Vallance et al. (2010), la participación microbiana en el efecto

supresor generalmente se verifica a través de la destrucción del microbiota del sustrato sin suelo por primera vez por esterilización y, finalmente, por una nueva inoculación. Cuando se compara con un sistema abierto sin recirculación, la actividad supresora en sistemas sin suelo podría explicarse por la recirculación de agua (McPherson et al. 1995; Tu y col. 1999, citado por Postma et al. 2008) que podría permitir un mejor desarrollo y propagación de microorganismos beneficiosos (Vallance et al. 2010).

Desde 2010, la supresión de los sistemas hidropónicos ha sido generalmente aceptada y los temas de investigación se han centrado más en el aislamiento y la caracterización de cepas antagonistas en cultivos sin suelo con especies de *Pseudomonas* como principales organismos estudiados. Si se demostró que los sistemas de cultivo sin suelo pueden ofrecer capacidad supresora, no hay una demostración similar de dicha actividad en los sistemas de acuaponía. Sin embargo, no hay indicios empíricos de que no sea así. Este optimismo surge de los descubrimientos de Gravel et al. (2015) y Sirakov et al. (2016) descrito en el segundo párrafo de esta sección. Además, se ha demostrado en hidroponía (Haarhoff y Cleasby 1991 citado por Calvo-bado et al. 2003; Van Os et al. 1999) pero también en el tratamiento del agua para consumo humano (revisado por Verma et al. 2017) que la filtración lenta (descrito en la sección 14.3.1) y, más precisamente, la filtración lenta de arena también puede actuar contra los patógenos de las plantas mediante una acción supresora microbiana además de otros factores físicos. En hidroponía, se ha demostrado que la filtración lenta es efectiva contra los patógenos de plantas revisados en la Tabla 14.4. Se supone que la actividad supresora microbiana en los filtros probablemente se deba a especies de *Bacillus* y / o *Pseudomonas* (Brand 2001; Déniel et al. 2004; Renault et al. 2007; Renault y col. 2012). Los resultados de Déniel et al. (2004) sugieren que, en hidroponía, el modo de acción de *Pseudomonas* y *Bacillus* se basa en la competencia por los nutrientes y la antibiosis, respectivamente. Sin embargo, modos adicionales de acción podrían estar presentes para estos dos géneros como ya se explicó para *Pseudomonas* spp. Las especies de Bacillus pueden, dependiendo del medio ambiente, actuar indirectamente por bioestimulación de la planta o la activación de las defensas de las plantas o directamente por antagonismo a través de la producción de sustancias antifúngicas y / o antibacterianas. Las enzimas que degradan la pared celular, las bacteriocinas y los antibióticos, los lipopéptidos (es decir, los biosurfactantes), se identifican como moléculas clave para esta última acción (Pérez-García et al. 2011; Beneduzi et al. 2012; Narayanasamy 2013). A fin de cuentas, el funcionamiento de un filtro lento no es tan diferente del funcionamiento de algunos biofiltros utilizados en acuaponía. Además, algunas bacterias heterotróficas como *Pseudomonas* spp. ya se

identificaron en biofiltros de acuaponía (Schmautz et al. 2017). Esto está de acuerdo con los resultados de otros investigadores que detectaron con frecuencia *Bacillus* y / o *Pseudomonas* en biofiltros RAS (sistema de acuícultura recirculada) (Tal et al. 2003; Sugita et al. 2005; Schreier et al. 2010; Munguia-Fragozo et al. 2015; Rurangwa y Verdegem 2015).

Sin embargo, hasta ahora, no se ha realizado ningún estudio sobre la posible supresión en biofiltros de acuaponía.

14.3 PROTECCIÓN DE PLANTAS DE PATÓGENOS EN ACUAPONÍA

En este momento, los practicantes de acuaponía que operan un sistema acoplado están relativamente indefensos contra las enfermedades de las plantas cuando ocurren, especialmente en el caso de los patógenos de la raíz. Ningún pesticida ni biopesticida se desarrolla específicamente para uso acuapónico (Rakocy 2007; Rakocy 2012; Somerville et al. 2014; Bittsanszky et al. 2015; Sirakov et al. 2016). En resumen, todavía faltan métodos curativos. Solo Somerville et al. (2014) enumeran los compuestos inorgánicos que pueden usarse contra hongos en acuaponía. En cualquier caso, un diagnóstico apropiado de los patógenos que causan la enfermedad es obligatorio para identificar el (los) objetivo (s) para las medidas curativas. Este diagnóstico requiere una buena experiencia en términos de capacidad de observación, comprensión del ciclo del patógeno de la planta y análisis de la situación. Sin embargo, en caso de síntomas generalistas (no específicos) y dependiendo del grado de precisión necesario, a menudo es necesario utilizar técnicas de laboratorio para validar la hipótesis con respecto al agente causal (Lepoivre 2003). Postma y col. (2008) revisaron los diferentes métodos para detectar patógenos de plantas en hidroponía, y se identificaron cuatro grupos:

Tabla 14.4 Revisión de los patógenos de las plantas efectivamente eliminados por filtración lenta en hidroponía

Patogenos en las Plantas	Referencias
Xanthomonas campestris pv. *Pelargonii*	Brand (2001)
Fusarium oxysporum	Wohanka (1995), Ehret et al. (1999) cited by Ehret et al. (2001), van Os et al. (2001), Déniel et al. (2004), and Furtner et al. (2007)
Pythium spp.	Déniel et al. (2004)
Pythium aphanidermatum	Ehret et al. (1999) cited by Ehret et al. (2001), and Furtner et al. (2007)
Phytophthora cinnamomi	Van Os et al. (1999), 4 references cited by Ehret et al. (2001)
Phytophthora cryptogea	Calvo-bado et al. (2003)
Phytophthora cactorum	Evenhuis et al. (2014)

1.Observación directa macroscópica y microscópica del patógeno.
2.Aislamiento del patógeno.
3.Uso de métodos serológicos.
4.Uso de métodos moleculares.

143.1 Métodos no biológicos de protección.

Las buenas prácticas agrícolas (BPA) para el control de patógenos de las plantas son las diversas acciones destinadas a limitar las enfermedades de los cultivos, tanto para el rendimiento como para la calidad de los productos (FAO 2008). Las BPA transponibles a acuaponía son prácticas físicas o de cultivo esencialmente no curativas que se pueden dividir en medidas preventivas y tratamiento del agua.

Medidas preventivas:
Las medidas preventivas tienen dos propósitos distintos. El primero es evitar la entrada del inóculo del patógeno en el sistema y el segundo es limitar (i) la infección de la planta, (ii) desarrollo y (iii) propagación del patógeno durante el período de crecimiento. Las medidas preventivas destinadas a evitar la entrada del inóculo inicial en el invernadero son, por ejemplo, un período de barbecho, una sala específica para el saneamiento, saneamiento de la sala (por ejemplo, eliminación de restos vegetales y desinfección de la superficie), ropa específica, semillas certificadas, una sala específica para germinación de plantas y barreras físicas (contra insectos vectores) (Stanghellini y Rasmussen 1994; Jarvis 1992; Albajes et al. 2002; Somerville et al.2014; Parvatha Reddy 2016). Entre las prácticas más importantes utilizadas para el segundo tipo de medidas preventivas se encuentran el uso de variedades de plantas resistentes, la desinfección de herramientas, la prevención del estrés abiótico de las plantas, el buen espaciamiento de las plantas, la prevención del desarrollo de algas y el manejo de las condiciones ambientales. La última medida, es decir, el manejo de las condiciones ambientales, significa controlar todos los parámetros del invernadero para evitar o limitar enfermedades interviniendo en su ciclo biológico (ibid.). En general, en estructuras de invernadero a gran escala, se utilizan software y algoritmos informáticos para calcular los parámetros óptimos que permiten la producción de plantas y el control de enfermedades. Los parámetros medidos, entre otros, son la temperatura (del aire y la solución de nutrientes), humedad, déficit de presión de vapor, velocidad del viento, probabilidad de rocío, humedad de las hojas y ventilación (ibid.). El profesional actúa sobre estos parámetros manipulando la calefacción, la ventilación, el sombreado, el suplemento de luces, el enfriamiento y el empañamiento (ibid.).

Tratamiento de aguas:
Se pueden emplear tratamientos físicos del agua para controlar los posibles patógenos del agua. Los tratamientos de filtración (tamaño de poro inferior a 10 µm), calor y UV se encuentran entre los más efectivos para eliminar los patógenos sin efectos nocivos para los peces y la salud de las plantas (Ehret et al. 2001; Hong y Moorman 2005; Postma et al. 2008; Van Os 2009; Timmons y Ebeling 2010). Estas técnicas permiten el control de brotes de enfermedades al disminuir el inóculo, la cantidad de patógenos y sus etapas de proliferación en el sistema de riego (ibid.). La desinfección física disminuye los patógenos del agua a un cierto nivel dependiendo de la agresividad del tratamiento. En general, el objetivo de la desinfección por calor y UV es la reducción de la población inicial de microorganismos en un 90-99.9% (ibid.). La técnica de filtración más utilizada es la filtración lenta debido a su confiabilidad y su bajo costo. Los sustratos de filtración generalmente utilizados son arena, lana de roca o puzolana (ibid.). La eficiencia de filtración depende esencialmente del tamaño de poro y el flujo. Para ser eficaz como tratamiento de desinfección, la filtración debe lograrse con un tamaño de poro inferior a 10 µm y una velocidad de flujo de 100 l / m2 / h, incluso si los parámetros de unión menos muestran rendimientos satisfactorios (ibid.). La filtración lenta no elimina todos los patógenos; Más del 90% de las bacterias aerobias totales permanecen en el efluente (ibid.).

Sin embargo, permite la supresión de restos vegetales, algas, partículas pequeñas y algunas enfermedades transmitidas por el suelo, como *Pythium y Phytophthora* (la eficiencia depende del género). Los filtros lentos no actúan solo por acción física, sino que también muestran una actividad supresora microbiana, gracias a microorganismos antagonistas, como se discute en la sección. 14.2.3 (Hong y Moorman 2005; Postma et al.2008; Van Os 2009; Vallance y col. 2010). El tratamiento térmico es muy efectivo contra los patógenos de las plantas. Sin embargo, requiere temperaturas que alcanzan los 95 C durante al menos 10 segundos para suprimir todo tipo de patógenos, incluidos los virus. Esta práctica consume mucha energía e impone la refrigeración por agua (intercambiador de calor y tanque de transición) antes de reinyectar el agua tratada en el circuito de riego. Además, tiene la desventaja de matar a todos los microorganismos, incluidos los beneficiosos (Hong y Moorman 2005; Postma et al. 2008; Van Os 2009). La última técnica y probablemente la más aplicada es la desinfección UV. El 20.8% de los practicantes de EU Aquaponics Hub lo usan (Villarroel et al.2016). La radiación UV tiene una longitud de onda de 200 a 280 nm. Tiene un efecto perjudicial sobre los microorganismos por daño directo del ADN. Dependiendo del patógeno y la turbulencia del agua, la dosis de energía varía entre 100 y 250 mJ / cm2 para ser efectivo

(Postma et al. 2008; Van Os 2009).

Los tratamientos físicos del agua eliminan la mayoría de los patógenos del agua entrante, pero no pueden erradicar la enfermedad cuando ya está presente en el sistema. El tratamiento físico del agua no cubre toda el agua (especialmente la zona de agua estancada cerca de las raíces), ni el tejido vegetal infectado. Por ejemplo, los tratamientos UV a menudo no logran suprimir la pudrición de la raíz de *Pythium* (Sutton et al. 2006). Sin embargo, si el tratamiento físico del agua permite una reducción de los patógenos de las plantas, en teoría, también tienen un efecto sobre los microorganismos no patógenos que potencialmente actúan sobre la supresión de la enfermedad. En realidad, los tratamientos con calor y UV crean un vacío microbiológico, mientras que la filtración lenta produce un cambio en la composición de la microbiota fluyente que da como resultado una mayor capacidad de supresión de la enfermedad (Postma et al. 2008; Vallance et al. 2010). A pesar de que el tratamiento con rayos ultravioleta y el tratamiento térmico en hidroponía eliminan más del 90% de los microorganismos en el agua de recirculación, no se observó disminución de la supresión de la enfermedad. Esto probablemente se debió a una cantidad demasiado baja de agua tratada y a una nueva contaminación del agua después del contacto con el sistema de riego, las raíces y los medios vegetales (ibid.).

El tratamiento del agua acuapónica por medio de productos químicos está limitado en la aplicación continua. La ozonización es una técnica utilizada en la acuicultura recirculada y en hidropónicos. El tratamiento con ozono tiene la ventaja de eliminar todos los patógenos, incluidos los virus en ciertas condiciones, y de descomponerse rápidamente en oxígeno (Hong y Moorman 2005; Van Os 2009; Timmons y Ebeling 2010; Gonçalves y Gagnon 2011). Sin embargo, tiene varias desventajas. La introducción de ozono en agua cruda puede producir subproductos oxidantes y una cantidad significativa de oxidantes residuales (p. Ej., Compuestos bromados y aniones haloxi que son tóxicos para los peces) que deben eliminarse, por radiación UV, por ejemplo, antes de volver a la parte del cultivo de peces. (revisado por Gonçalves y Gagnon 2011). Además, el tratamiento con ozono es costoso, irrita las membranas mucosas en caso de exposición humana, necesita períodos de contacto de 1 a 30 minutos en un rango de concentración de 0.1–2.0 mg / L, necesita un sumidero temporal para reducir completamente de O3 a O2 y puede oxidar elementos presentes en la solución nutritiva, como los quelatos de hierro, y por lo tanto no están disponibles para las plantas (Hong y Moorman 2005; Van Os 2009; Timmons y Ebeling 2010; Gonçalves y Gagnon 2011).

14.3.2 Métodos biológicos de protección

En hidroponía, numerosos artículos científicos revisan el uso de microorganismos antagonistas (es decir, capaces de inhibir otros organismos) para controlar los patógenos de las plantas, pero hasta ahora no se han realizado investigaciones para su uso en acuaponía. El modo de acción de estos microorganismos antagonistas es según Campbell (1989), Whipps (2001) y Narayanasamy (2013) agrupados en:

1. Competencia por nutrientes y nichos.
2. Parasitismo
3. Antibiosis
4. Inducción de resistencia a enfermedades en plantas.

Los experimentos que introducen microorganismos en los sistemas de acuaponía se han centrado en el aumento de la nitrificación mediante la adición de bacterias nitrificantes (Zou et al.2016) o el uso de promotores de crecimiento vegetal (PGPR) como *Azospirillum brasilense* y Bacillus spp. para aumentar el rendimiento de la planta (Mangmang et al.2014; Mangmang et al.2015a; Mangmang et al.2015b; Mangmang et al.2015c; da Silva Cerozi y Fitzsimmons 2016; Bartelme et al.2018). Ahora existe una necesidad urgente de trabajar en agentes de biocontrol (BCA) contra patógenos de plantas en acuaponía con respecto al uso restringido de tratamientos curativos sintéticos, el alto valor del cultivo y el aumento de los sistemas de acuaponía en el mundo. Los BCA se definen, en este contexto, como virus, bacterias y hongos que ejercen efectos antagónicos sobre los patógenos de las plantas (Campbell 1989; Narayanasamy 2013).
En general, la introducción de un BCA se considera más fácil en sistemas sin suelo. De hecho, el entorno de la raíz hidropónica es más accesible que en el suelo y la microbiota del sustrato también está desequilibrada debido a un vacío biológico. Además, las condiciones ambientales del invernadero pueden manipularse para lograr las necesidades de crecimiento de BCA. Teóricamente, todas estas características permiten una mejor introducción, establecimiento e interacción del BCA con las plantas en hidroponía que en el suelo (Paulitz y Bélanger 2001; Postma et al. 2009; Vallance et al. 2010). Sin embargo, en la práctica, la efectividad de la inoculación de BCA para controlar los patógenos de las raíces puede ser muy variable en los sistemas sin suelo (Postma et al. 2008; Vallance et al. 2010; Montagne et al. 2017). Una explicación para esto es que la selección de BCA se basa en pruebas in vitro que no representan condiciones reales y, posteriormente, una adaptación débil de estos microorganismos al ambiente acuático utilizado en hidroponía o acuaponía (Postma et al. 2008; Vallance et al. 2010). Para controlar los patógenos de las plantas y, más

especialmente, los responsables de la pudrición de las raíces, se necesita una selección e identificación de los microorganismos involucrados en los sistemas acuáticos que muestran actividad supresora contra los patógenos de las plantas.

En cultivos sin suelo, se pueden seleccionar varios microorganismos antagonistas debido a que su ciclo biológico es similar a los patógenos de la raíz o su capacidad de crecer en condiciones acuosas. Tal es el caso de las especies y bacterias no patógenas de *Pythium y Fusarium*, donde *Pseudomonas, Bacillus* y *Lysobacter* son los géneros más representados en la literatura (Paulitz y Bélanger 2001; Khan y col. 2003; Chatterton y col. 2004; Folman y col. 2004; Sutton y col. 2006; Liu y col. 2007; Postma y col. 2008; Postma y col. 2009; Vallance y col. 2010; Sopher y Sutton 2011; Hultberg y col. 2011; Lee y Lee 2015; Martin y Loper 1999; Moruzzi y col. 2017; Thongkamngam y Jaenaksorn 2017). También se ha estudiado la adición directa de algunos metabolitos microbianos como los biosurfactantes (Stanghellini y Miller 1997; Nielsen et al. 2006; Nielsen et al. 2006). Aunque algunos microorganismos son eficientes para controlar los patógenos de la raíz, hay otros problemas que deben superarse para producir un bioplaguicida. Los principales desafíos son determinar los medios de inoculación, la densidad del inóculo, la formulación del producto (Montagne et al. 2017), el método para la producción de una cantidad suficiente a bajo costo y el almacenamiento del producto formulado. Los estudios ecotoxicológicos sobre peces y microorganismos beneficiosos vivos en el sistema también son un punto importante. Otra posibilidad que podría explotarse es el uso de un complejo de agentes antagonistas, como se observa en las técnicas supresoras del suelo (Spadaro y Gullino 2005; Vallance et al. 2010). De hecho, los microorganismos pueden funcionar en sinergia o con modos de acción complementarios (ibid.). La adición de enmiendas también podría mejorar el potencial de BCA al actuar como prebióticos (ver Sección 14.4).

14.4 EL PAPEL DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LA ACTIVIDAD DE BIOCONTROL EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS

En la secta. 14.2.3, se sugirió la supresión de los sistemas acuaponicos. Como se indicó anteriormente, la hipótesis principal está relacionada con la recirculación del agua como lo es para los sistemas hidropónicos. Sin embargo, existe una segunda hipótesis y está vinculada a la presencia de materia orgánica en el sistema. Materia orgánica que podría impulsar un ecosistema microbiano más equilibrado que incluye agentes antagonistas que son menos adecuados para los patógenos de las plantas (Rakocy 2012).

En acuaponía, la materia orgánica proviene del suministro de agua, alimentos no consumidos, heces de peces, sustrato orgánico de plantas, actividad microbiana, exudados de raíces y residuos de plantas (Waechter-Kristensen et al. 1997; Naylor et al. 1999; Waechter-Kristensen et al. 1999). En dicho sistema, las bacterias heterotróficas son organismos capaces de utilizar materia orgánica como fuente de carbono y energía, generalmente en forma de carbohidratos, aminoácidos, péptidos o lípidos (Sharrer et al. 2005; Willey et al. 2008; Whipps 2001). En la acuicultura recirculada (RAS), se localizan principalmente en el biofiltro y consumen partículas orgánicas atrapadas en él (Leonard et al. 2000; Leonard et al. 2002). Sin embargo, otra fuente de carbono orgánico para las bacterias heterotróficas son las sustancias húmicas presentes como materia orgánica disuelta y responsables de la coloración amarillo-amarronada del agua (Takeda y Kiyono 1990 citado por Leonard et al. 2002; Hirayama et al. 1988). En el suelo, así como en hidroponía, se sabe que los ácidos húmicos estimulan el crecimiento de la planta y la mantienen bajo condiciones de estrés abiótico (Bohme 1999; du Jardin 2015). Las plantas pueden usar proteínas en el agua como una fuente alternativa de nitrógeno, mejorando así su crecimiento y resistencia a los patógenos (Adamczyk et al. 2010). En el agua recirculada, la abundancia de bacterias heterótrofas de vida libre se correlaciona con la cantidad de carbono orgánico disponible y relación carbono-nitrógeno orgánico (C / N) (Leonard et al. 2000; Leonard y col. 2002; Michaud y col. 2006; Attramadal y col. 2012). En el biofiltro, un aumento en la relación C / N aumenta la abundancia de bacterias heterotróficas a expensas del número de bacterias autótrofas responsables del proceso de nitrificación (Michaud et al. 2006; Michaud et al. 2014). Como está implícito, los microorganismos heterotróficos pueden tener un impacto negativo en el sistema porque compiten con las bacterias autótrofas (por ejemplo, las bacterias nitrificantes) por el espacio y el oxígeno. Algunos de ellos son patógenos de plantas o peces, o responsables del mal olor en los peces (Chang-Ho 1970; Funck-Jensen y Hockenhull 1983; Jones et al. 1991; Leonard et al. 2002; Nogueira et al. 2002; Michaud et al. al.2006; Mukerji 2006; Whipps 2001; Rurangwa y Verdegem 2015). Sin embargo, los microorganismos heterotróficos involucrados en el sistema también pueden ser positivos (Whipps 2001; Mukerji 2006). Varios estudios que utilizan fertilizantes orgánicos o medios orgánicos sin suelo, en hidroponía, han mostrado efectos interesantes donde la microbiota residente pudo controlar las enfermedades de las plantas (Montagne et al. 2015). Todos los sustratos orgánicos tienen sus propias propiedades fisicoquímicas. En consecuencia, las características de los medios influirán en la riqueza y funciones microbianas. Por lo tanto, la elección de un medio vegetal específico podría influir en el desarrollo microbiano para tener un efecto supresor sobre los patógenos (Montagne et al. 2015; Grunert et al.

2016; Montagne et al. 2017) Otra posibilidad de supresión de patógenos relacionada con el carbono orgánico es el uso de enmiendas orgánicas en hidroponía (Maher et al. 2008; Vallance et al. 2010). Al agregar compost en medios sin suelo como es de uso común en el suelo, se esperan efectos supresores (Maher et al. 2008). Mejorar o mantener un microorganismo específico, como la población de *Pseudomonas*, agregando algunas fuentes de carbono formuladas (por ejemplo, un producto a base de nitrapyrina) según lo informado por Pagliaccia et al. (2007) y Pagliaccia et al. (2008) es otra posibilidad. La aparición del cultivo orgánico sin suelo también destaca la participación de microorganismos beneficiosos contra los patógenos de las plantas respaldados por el uso de fertilizantes orgánicos. Fujiwara y col. (2013), Chinta et al. (2014) y Chinta et al. (2015) informaron que la fertilización con licor fuerte de maíz ayuda a controlar *Fusarium oxysporum* f.sp. *lactucae* y *Botrytis cinerea* en lechugas y *Fusarium oxysporum* f.sp. *radicis-lycopersici* en plantas de tomate. E incluso si apenas se recomienda su uso en acuaponia, 1 g / L de fertilizante soluble a base de pescado (Shinohara et al. 2011) suprime la marchitez bacteriana en el tomate causada por *Ralstonia solanacearum* en hidroponía (Fujiwara et al. 2012).

Finalmente, aunque la información sobre el impacto de la materia orgánica en la protección de las plantas en acuaponía es escasa, los diversos elementos mencionados anteriormente muestran su capacidad potencial para promover una microbiota supresora de patógenos y plantas específicas del sistema.

14.5 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FUTURAS

Este capítulo tuvo como objetivo proporcionar un primer informe de los patógenos de las plantas que ocurren en acuaponía, revisando los métodos reales y las posibilidades futuras para controlarlos. Cada estrategia tiene ventajas y desventajas y debe diseñarse a fondo para adaptarse a cada caso. Sin embargo, en este momento, los métodos curativos en los sistemas de acuaponía acoplados aún son limitados y se deben encontrar nuevas perspectivas de control. Afortunadamente, podría considerarse la supresión en términos de sistemas acuaponicos, como ya se observó en hidropónicos (por ejemplo, en medios vegetales, agua y filtros lentos). Además, la presencia de materia orgánica en el sistema es un factor alentador en comparación con los sistemas de cultivo sin suelo que utilizan fertilizantes orgánicos, medios vegetales orgánicos o enmiendas orgánicas.

Para el futuro, parece importante investigar esta acción supresora seguida

de la identificación y caracterización de los microbios responsables o los consorcios de microbios. Sobre la base de los resultados, se podrían prever varias estrategias para mejorar la capacidad de las plantas para resistir los patógenos. El primero es el control biológico por conservación, lo que significa favorecer a los microorganismos beneficiosos mediante la manipulación y gestión de la composición del agua (por ejemplo, relación C / N, nutrientes y gases) y parámetros (por ejemplo, pH y temperatura). Pero la identificación de estos factores influyentes debe realizarse primero. Este manejo de las bacterias autotróficas y heterotróficas también es de importancia clave para mantener una buena nitrificación y mantener peces sanos. La segunda estrategia es el control biológico aumentativo mediante la liberación adicional de microorganismos beneficiosos ya presentes en el sistema en grandes cantidades (método de inundación) o en pequeñas cantidades, pero repetidos en el tiempo (método de inoculación). Pero se debe lograr la identificación previa y la multiplicación de un BCA acuapónico. La tercera estrategia es la importación, es decir, la introducción de un nuevo microorganismo que normalmente no está presente en el sistema. En este caso, se necesita la selección de un microorganismo adaptado y seguro para el medio ambiente acuapónico. Para las dos últimas estrategias, el sitio de inoculación en el sistema debe considerarse dependiendo del objetivo deseado. Los sitios donde se podría mejorar la actividad microbiana son el agua recirculada, la rizosfera (incluidos los medios vegetales), el biofiltro (como en filtros lentos de arena donde ya se ha probado la adición de BCA) y la filosfera (es decir, parte de la planta aérea). Cualquiera sea la estrategia, el objetivo final debe ser llevar a las comunidades microbianas a proporcionar un entorno microbiano estable y ecológicamente equilibrado que permita una buena producción de plantas y peces.

Para concluir, seguir los requisitos del manejo integrado de plagas de plantas (MIP) es una necesidad para manejar correctamente el sistema y evitar el desarrollo y la propagación de enfermedades de las plantas (Bittsanszky et al. 2015; Nemethy et al. 2016). El principio de IPM es aplicar pesticidas químicos u otros agentes como último recurso cuando se alcanza el nivel de daño económico. En consecuencia, el control de los patógenos deberá basarse primero en métodos físicos y biológicos (descritos anteriormente), su combinación y una detección y monitoreo eficientes de la enfermedad (Parlamento Europeo 2009).

REFERENCIAS

Adamczyk B, Smolander A, Kitunen V, Godlewski M (2010) Proteins as nitrogen source for plants: a short story about exudation of proteases by

plant roots. Plant Signal Behav 5:817–819. https://doi.org/10.4161/psb.5.7.11699

Albajes R, Lodovica Gullino M, Van Lenteren JC, Elad Y (2002) Integrated pest and disease

management in greenhouse crops. Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1017/ CBO9781107415324.004

Alhussaen K (2006) Pythium and phytophthora associated with root disease of hydroponic lettuce.

University of Technologie Sydney Faculty of Science. https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/

36864

Anderson TS, de Villiers D, Timmons MB (2017) Growth and tissue elemental composition response of Spinach (Spinacia oleracea) to hydroponic and aquaponic water quality conditions. Horticulturae 3:32. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020032

Arras G, Arru S (1997) Mechanism of action of some microbial antagonists against fungal pathogens. Ann Microbiol Enzimol 47:97–120

Attramadal KJK, Salvesen I, Xue R, Øie G, Størseth TR, Vadstein O, Olsen Y (2012) Recirculation as a possible microbial control strategy in the production of marine larvae. Aquac Eng 46:27–39. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.10.003

Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet OJ, Newton RJ (2018) Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. Front Microbiol 9:8. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008

Beneduzi A, Ambrosini A, Passaglia LMP (2012) Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. Genet Mol Biol 35(4):1044–1051

Bittsanszky A, Gyulai G, Junge R, Schmautz Z, Komives T, Has CAR, Otto H (2015) Plant protection in ecocycle-based agricultural systems : aquaponics as an example. In: International Plant Protection Congress (IPPC), Berlin, Germany, pp 2–3. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4458.0321

Bohme M (1999) Effects of Lactate, Humate and Bacillus subtilis on the growth of tomato plants in hydroponic systems. In: International symposium on growing media and hydroponics. Acta Horticulturae, pp 231–239

Brand T (2001) Importance and characterization of the biological component in slow filters. Acta Hortic 554:313–321

Calvo-bado LA, Pettitt TR, Parsons N, Petch GM, Morgan JAW, Whipps JM (2003) Spatial and Temporal Analysis of the Microbial Community in Slow Sand Filters Used for Treating Horticultural Irrigation Water. Appl Enviromental Microbiol 69:2116–2125.

https://doi.org/10.1128/AEM.69.4.2116
Campbell R (1989) Biological control of microbial plant pathogens. Cambridge University Press, Cambridge
Chang-Ho Y (1970) The effect of pea root exudate on the germination of Pythium aphanidermatum
zoospore cysts. Can J Bot 48:1501–1514
Chatterton S, Sutton JC, Boland GJ (2004) Timing Pseudomonas chlororaphis applications to control Pythium aphanidermatum, Pythium dissotocum, and root rot in hydroponic peppers. Biol Control 30:360–373. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2003.11.001
Cherif M, Tirilly Y, Belanger RR (1997) Effect of oxygen concentration on plant growth, lipid peroxidation, and receptivity of tomato roots to Pythium under hydroponic conditions. Eur J Plant Pathol 103:255–264
Chinta YD, Kano K, Widiastuti A, Fukahori M, Kawasaki S, Eguchi Y, Misu H, Odani H, Zhou S, Narisawa K, Fujiwara K, Shinohara M, Sato T (2014) Effect of corn steep liquor on lettuce rootrot (Fusarium oxysporum f.sp. lactucae) in hydroponic cultures. J Sci Food Agric
94:2317–2323. https://doi.org/10.1002/jsfa.6561
Chinta YD, Eguchi Y, Widiastuti A, Shinohara M, Sato T (2015) Organic hydroponics induces systemic resistance against the air-borne pathogen, Botrytis cinerea (gray mould). J Plant Interact 10:243–251. https://doi.org/10.1080/17429145.2015.1068959
Colhoun J (1973) Effects of environmental factors on plant disease. Annu Rev Phytopathol
11:343–364da Silva Cerozi B, Fitzsimmons K (2016) Use of Bacillus spp. to enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems. Sci Hortic (Amsterdam)
211:277–282. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.005
Delaide B, Goddek S, Gott J, Soyeurt H, Jijakli HM (2016) Lettuce (Lactuca sativa L. var. Sucrine)
growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. Water
8:1–11. https://doi.org/10.3390/w8100467
Déniel F, Rey P, Chérif M, Guillou A, Tirilly Y (2004) Indigenous bacteria with antagonistic and plant-growth-promoting activities improve slow-filtration efficiency in soilless cultivation. Can J Microbiol 50:499–508. https://doi.org/10.1139/w04-034
Dordas C (2008) Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture: a review.Agron Sustain Dev 28:33–46. https://doi.org/10.1051/agro:2007051
du Jardin P (2015) Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Sci Hortic (Amsterdam) 196:3–14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Ehret DL, Bogdanoff C, Utkhede R, Lévesque A, Menzies JG, Ng K, Portree J (1999) Disease control with slow filtration for greenhouse crops grown in recirculation. Pacific Agri-Food Res Cent Cent Tech Rep 155:37

Ehret DL, Alsanius B, Wohanka W, Menzies JG, Utkhede R (2001) Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture. Agronomie 21:323–339. https://doi.org/10.1051/agro:2001127

European Parliament (2009) Directive 2009/128/EC of the European Parliament and the Council of 21 October 2009 establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. October 309, pp 71–86. https://doi.org/10.3000/17252555.L_2009.309

Evenhuis B, Nijhuis E, Lamers J, Verhoeven J, Postma J (2014) Alternative methods to control phytophthora cactorum in strawberry cultivated in soilless growing media, Acta Hortic 1044:337–342. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1044.44

FAO (2008) Good agricultural practices [WWW Document]. http://www.fao.org/prods/gap/. Accessed 27 Feb 2018

Folman LB, De Klein MJEM, Postma J, Van Veen JA (2004) Production of antifungal compounds by Lysobacter enzymogenes isolate 3.1T8 under different conditions in relation to its efficacy as a biocontrol agent of Pythium aphanidermatum in cucumber. Biol. Control 31:145–154. https:// doi.org/10.1016/j.biocontrol.2004.03.008

Fujiwara K, Aoyama C, Takano M, Shinohara M (2012) Suppression of Ralstonia solanacearum bacterial wilt disease by an organic hydroponic system. J Gen Plant Pathol. https://doi.org/10.1007/s10327-012-0371-0

Fujiwara K, Iida Y, Iwai T, Aoyama C, Inukai R, Ando A, Ogawa J, Ohnishi J, Terami F, Takano M, Shinohara M (2013) The rhizosphere microbial community in a multiple parallel mineralization sistem suppresses the pathogenic fungus Fusarium oxysporum. Microbiologyopen 2:997–1009. https://doi.org/10.1002/mbo3.140

Funck-Jensen D, Hockenhull J (1983) Is damping-off, caused by Pythium, less of a problem in hydroponics than in traditional growing systems? Acta Hortic 133:137–145

Furtner B, Bergstrand K, Brand T (2007) Abiotic and biotic factors in slow filters integrated to closed hydroponic systems. Eur J Hortic Sci 72:104–112

Ganeshan G, Kumar AM (2005) Pseudomonas fluorescens, a potential bacterial antagonist to control plant diseases. J Plant Interact 1:123–134. https://doi.org/10.1080/17429140600907043

Geary B, Clark J, Hopkins BG, Jolley VD (2015) Deficient, adequate and excess nitrogen levels established in hydroponics for biotic and abiotic stress-interaction studies in potato. J Plant Nutr 38:41–50.

https://doi.org/10.1080/01904167.2014.912323
Goddek S, Vermeulen T (2018) Comparison of Lactuca sativa growth performance in rainwater and RAS-water-based hydroponic nutrient solutions. Aquac Int 10. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0293-8
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Vala Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman KJ (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water (Switzerland) 8:1–29. https://doi.org/10.3390/W8070303
Gonçalves AA, Gagnon GA (2011) Ozone application in recirculating aquaculture system: an overview. Ozone Sci Eng 33:345–367. https://doi.org/10.1080/01919512.2011.604595
Gravel V, Dorais M, Dey D, Vandenberg G (2015) Fish effluents promote root growth and suppress fungal diseases in tomato transplants. Can J Plant Sci 95:427–436
Grunert O, Hernandez-Sanabria E, Vilchez-Vargas R, Jauregui R, Pieper DH, Perneel M, Van Labeke M-C, Reheul D, Boon N (2016) Mineral and organic growing media have distinct community structure, stability and functionality in soilless culture systems. Sci. Rep. 6:18837. https://doi.org/10.1038/srep18837
Haarhoff J, Cleasby JL (1991) Biological and physical mechanisms in slow sand filtration. In: Logsdon GS (ed) Slow sand filtration, vol 1. American Society of Civil Engineers, New York, pp 19–68
Haas D, Défago G (2005) Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. Nat Rev Microbiol 3:307–319. https://doi.org/10.1038/nrmicro1129
Hirayama K, Mizuma H, Mizue Y (1988) The accumulation of dissolved organic substances in closed recirculation culture systems. Aquac Eng 7:73–87. https://doi.org/10.1016/0144-8609(88)90006-4
Hong CX, Moorman GW (2005) Plant pathogens in irrigation water: challenges and opportunities. CRC Crit Rev Plant Sci 24:189–208. https://doi.org/10.1080/07352680591005838
Hultberg M, Holmkvist A, Alsanius B (2011) Strategies for administration of biosurfactant- producing pseudomonads for biocontrol in closed hydroponic systems. Crop Prot 30:995–999. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.04.012
James, Becker JO (2007) Identifying microorganisms involved in specific pathogen suppression in soil. Annu Rev Phytopathol 45:153–172. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.45.062806.094354

Jarvis WR (1992) Managing disease in greenhouse crops. The American Phytopathological Soci- ety, St. Paul

Jones SW, Donaldson SP, Deacon JW (1991) Behaviour of zoospores and zoospore cysts in relation to root infection by Pythium aphanidermatum. New Phytol 117:289–301. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb04910.x

Khalil S, Alsanius BW (2001) Dynamics of the indigenous microflora inhabiting the root zone and the nutrient solution of tomato in a commercial closed greenhouse system. Gartenbauwissenschaft 66:188–198

Khalil S, Alsanius WB (2011) Effect of growing medium water content on the biological control of root pathogens in a closed soilless system. J Hortic Sci Biotechnol 86:298–304. https://doi.org/10.1080/14620316.2011.11512764

Khalil S, Hultberg M, Alsanius BW (2009) Effects of growing medium on the interactions between biocontrol agents and tomato root pathogens in a closed hydroponic system. J Hortic Sci Biotechnol 84:489–494. https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512553

Khan A, Sutton JC, Grodzinski B (2003) Effects of Pseudomonas chlororaphis on Pythium aphanidermatum and root rot in peppers grown in small-scale hydroponic troughs. Biocontrol Sci Technol 13:615–630. https://doi.org/10.1080/0958315031000151783

Koohakan P, Ikeda H, Jeanaksorn T, Tojo M, Kusakari S-I, Okada K, Sato S (2004) Evaluation of the indigenous microorganisms in soilless culture: occurrence and quantitative characteristics in the different growing systems. Sci Hortic (Amsterdam) 101:179–188. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.09.012

Lee S, Lee J (2015) Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: types and characteristics of hydroponic food production methods. Sci Hortic (Amsterdam) 195:206–215. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.011

Leonard N, Blancheton JP, Guiraud JP (2000) Populations of heterotrophic bacteria in an exper- imental recirculating aquaculture system. Aquac Eng 22:109–120

Leonard N, Guiraud JP, Gasset E, Cailleres JP, Blancheton JP (2002) Bacteria and nutrients –

nitrogen and carbon – in a recirculating system for sea bass production. Aquac Eng 26:111–127

Lepoivre P (2003) Phytopathologie, 1st editio. ed. Les Presses Agronomiques de Gembloux Bruxelles: De Boeck

Liu W, Sutton JC, Grodzinski B, Kloepper JW, Reddy MS (2007) Biological control of pythium root rot of chrysanthemum in small-scale hydroponic units. Phytoparasitica 35:159–178. https://

doi.org/10.1007/BF02981111
Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015) Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023
Maher M, Prasad M, Raviv M (2008) Ch 11 – organic soilless media components. In: Soilless culture: theory and practice. Elsevier B.V., Amsterdam, pp 459–504. https://doi.org/10.1016/ B978-044452975-6.50013-7
Mangmang JS, Deaker R, Rogers G (2014) Response of lettuce seedlings fertilized with fish effluent to Azospirillum brasilense inoculation. Biol Agric Hortic 31:61–71. https://doi.org/10.1080/01448765.2014.972982
Mangmang JS, Deaker R, Rogers G (2015a) Inoculation effect of Azospirillum brasilense on basil grown under aquaponics production system. Org Agric 6:65–74. https://doi.org/10.1007/ s13165-015-0115-5
Mangmang JS, Deaker R, Rogers G (2015b) Maximizing fish effluent utilization for vegetable seedling production by Azospirillum Brasilense. Procedia Environ Sci 29:179. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.248
Mangmang JS, Deaker R, Rogers G (2015c) Response of Cucumber Seedlings Fertilized with Fish Effluent to Azospirillum brasilense. Int J Veg Sci 5260:150409121518007. https://doi.org/10.1080/19315260.2014.967433
Martin FN, Loper JE (1999) Soilborne plant diseases caused by Pythium spp.: ecology, epidemi- ology, and prospects for biological control soilborne plant diseases caused by Pythium spp.: ecology, epidemiology, and prospects for biological control. CRC Crit Rev Plant Sci 18:11–181
McMurty MR, Nelson PV, Sanders DC, Hodges L (1990) Sand culture of vegetables using recirculated aquacultural effluents. Appl Agric Res 5:280–284
McPherson GM, Harriman MR, Pattison D (1995) The potential for spread of root diseases in recirculating hydroponic systems and their control with disinfection. Med Fac Landbouww Univ Gent 60:371–379
Michaud L, Blancheton JP, Bruni V, Piedrahita R (2006) Effect of particulate organic carbon on heterotrophic bacterial populations and nitrification efficiency in biological filters. Aquac Eng 34:224–233. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.07.005
Michaud L, Giudice AL, Interdonato F, Triplet S, Ying L, Blancheton JP (2014) C/N ratio-induced structural shift of bacterial communities inside lab-scale aquaculture biofilters. Aquac Eng 58:77–87. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.11.002
Mitchell CE, Reich PB, Tilman D, Groth JV (2003) Effects of elevated CO2,

nitrogen deposition, and decreased species diversity on foliar fungal plant disease. Glob Chang Biol 9, 438–451. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00602.x

Monsees H, Kloas W, Wuertz S (2017) Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12:1–18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056

Montagne V, Charpentier S, Cannavo P, Capiaux H, Grosbellet C, Lebeau T (2015) Structure and activity of spontaneous fungal communities in organic substrates used for soilless crops. Sci Hortic (Amsterdam) 192:148–157. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.011

Montagne V, Capiaux H, Barret M, Cannavo P, Charpentier S, Grosbellet C, Lebeau T (2017) Bacterial and fungal communities vary with the type of organic substrate: implications for biocontrol of soilless crops. Environ Chem Lett 15:537–545. https://doi.org/10.1007/s10311-017-0628-0

Moruzzi S, Firrao G, Polano C, Borselli S, Loschi A, Ermacora P, Loi N, Martini M (2017) Genomic-assisted characterisation of Pseudomonas sp. strain Pf4, a potential biocontrol agent in hydroponics. Biocontrol Sci Technol 27:969–991. https://doi.org/10.1080/09583157.2017.1368454

Mukerji KG (2006) Microbial Activity in the Rhizosphere. Springer/GmbH & Co, Dordrecht/Berlin and Heidelberg. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Munguia-Fragozo P, Alatorre-Jacome O, Rico-Garcia E, Torres-Pacheco I, Cruz-Hernandez A, Ocampo-Velazquez RV, Garcia-Trejo JF, Guevara-Gonzalez RG (2015) Perspective for Aquaponic Systems: (Omic) Technologies for Microbial Community Analysis. Biomed Res Int 2015:10. https://doi.org/10.1155/2015/480386

Narayanasamy P (2013) Biological management of diseases of crops: volume 1: characteristics of biological control agents, Biological management of diseases of crops. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6380-7_1

Naylor SJ, Moccia RD, Durant GM (1999) The chemical composition of settleable solid fish waste (manure) from commercial rainbow trout farms in Ontario. Canada N Am J Aquac 61:21–26. https://doi.org/10.1577/1548-8454(1999)061<0021:TCCOSS>2.0.CO;2

Nemethy S, Bittsanszky A, Schmautz Z, Junge R, Komives T (2016) Protecting plants from pests and diseases in aquaponic systems. In: Ecological footprint in Central Europe. The University College of Tourism and Ecology Press, Sucha Beskidzka, pp 1–8

Nielsen CJ, Ferrin DM, Stanghellini ME (2006) Efficacy of biosurfactants in the management of Phytophthora capsici on pepper in recirculating hydroponic systems. Can J Plant Pathol 28:450–460. https://doi.org/10.1080/07060660609507319

Nogueira R, Melo LF, Purkhold U, Wuertz S, Wagner M (2002) Nitrifying

and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon. Water Res 36:469–481

Pagliaccia D, Ferrin D, Stanghellini ME (2007) Chemo-biological suppression of root-infecting zoosporic pathogens in recirculating hydroponic systems. Plant Soil 299:163–179. https://doi.org/10.1007/s11104-007-9373-7

Pagliaccia D, Merhaut D, Colao MC, Ruzzi M, Saccardo F, Stanghellini ME (2008) Selective enhancement of the fluorescent pseudomonad population after amending the recirculating nutrient solution of hydroponically grown plants with a nitrogen stabilizer. Microb Ecol 56:538–554. https://doi.org/10.1007/s00248-008-9373-z

Pantanella E, Cardarelli M, Colla G, Rea E, Marcucci A (2010) Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop, pp 887–893. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109

Pantanella E, Cardarelli M, Di Mattia E, Colla G (2015) Aquaponics and food safety: effects of UV sterilization on total coliforms and lettuce production. In: Conference and exhibition on soilless culture, pp 71–76

Parvatha Reddy P (2016) Sustainable crop protection under protected cultivation. Springer. https://doi.org/DOI, Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3_7

Paulitz TC, Bélanger RR (2001) Biological control in greenhouse systems. Annu Rev Phytopathol 39:103–133

Pérez-García A, Romero D, de Vicente A (2011) Plant protection and growth stimulation by microorganisms: biotechnological applications of Bacilli in agriculture. Curr Opin Biotechnol 22(2):187–193. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.12.003

Postma J, van Os E, Bonants PJM (2008) Ch 10 – pathogen detection and management strategies in soilless plant growing system. In: Soilless culture: theory and practice. Elsevier B.V., Amster- dam, pp. 425–457. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52975-6.50012-5

Postma J, Stevens LH, Wiegers GL, Davelaar E, Nijhuis EH (2009) Biological control of Pythium aphanidermatum in cucumber with a combined application of Lysobacter enzymogenes strain 3.1T8 and chitosan. Biol Control 48:301–309. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.11.006

Rakocy J (2007) Ten guidelines for aquaponic systems. Aquaponics J 46:14–17

Rakocy JE (2012) Aquaponics – integrating fish and plant culture. In: Tidwell JH (ed) Aquaculture production systems. Wiley, New York, pp 343–386

Rakocy JE, Maseer PM, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics – integrated fish and plant culture.

South Reg Aquac Cent Publication No. 454, 16pp. http://srac.tamu.edu/getfile.cfm?pubid¼105

Renault D, Déniel F, Benizri E, Sohier D, Barbier G, Rey P (2007) Characterization of Bacillus and Pseudomonas strains with suppressive traits isolated from tomato hydroponic-slow filtration unit. Can J Microbiol 53:784–797. https://doi.org/10.1139/W07-046

Renault D, Vallance J, Déniel F, Wery N, Godon JJ, Barbier G, Rey P (2012) Diversity of bacterial communities that colonize the filter units used for controlling plant pathogens in soilless cultures. Microb Ecol 63:170–187. https://doi.org/10.1007/s00248-011-9961-1

Resh HM (2013) Hydroponic food production : a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower, 7th edn. CRC Press, Boca Raton

Rosberg AK (2014) Dynamics of root microorganisms in closed hydroponic cropping systems. Department of Biosystems and Technology, Swedish University of Agricultural Science, Alnarp

Rurangwa E, Verdegem MCJ (2015) Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management. Rev Aquac 7:117–130. https://doi.org/10.1111/raq.12057

Saha S, Monroe A, Day MR (2016) Growth, yield, plant quality and nutrition of basil (Ocimum basilicum L.) under soilless agricultural systems. Ann Agric Sci 61:181–186. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2016.10.001

Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits THM (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 1–8. https://doi.org/10.1007/s00203-016-1334-1

Schreier HJ, Mirzoyan N, Saito K (2010) Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems. Curr Opin Biotechnol 21:318–325. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.011

Sharrer MJ, Summerfelt ST, Bullock GL, Gleason LE, Taeuber J (2005) Inactivation of bacteria using ultraviolet irradiation in a recirculating salmonid culture system. Aquac Eng 33:135–149. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.12.001

Shinohara M, Aoyama C, Fujiwara K, Watanabe A, Ohmori H, Uehara Y, Takano M (2011) Microbial mineralization of organic nitrogen into nitrate to allow the use of organic fertilizer in hydroponics. Soil Sci Plant Nutr 57:190–203. https://doi.org/10.1080/00380768.2011.554223

Sirakov I, Lutz M, Graber A, Mathis A, Staykov Y (2016) Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponic system. Water 8:1–7. https://doi.org/10.3390/w8110518

Snoeijers SS, Alejandro P (2000) The effect of nitrogen on disease development and gene expression in bacterial and fungal plant

pathogens. Eur J Plant Pathol 106:493–506
Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production – integrated fish and plant farming. FAO, Rome
Sopher CR, Sutton JC (2011) Quantitative relationships of Pseudomonas chlororaphis 63-28 to Pythium root rot and growth in hydroponic peppers. Trop Plant Pathol 36:214–224. https://doi. org/10.1590/S1982-56762011000400002
Spadaro D, Gullino ML (2005) Improving the efficacy of biocontrol agents against soilborne pathogens. Crop Prot 24:601–613. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.11.003
Stanghellini ME, Miller RM (1997) Their identity and potencial efficacy in the biological control of zoosporic plant pathogens. Plant Dis 81:4–12
Stanghellini ME, Rasmussen SL (1994) Hydroponics: a solution for zoosporic pathogens. Plant Dis 78:1129–1138
Stouvenakers G, Sébastien M, Haissam JM (2017) Biocontrol properties of recirculating aquacul- ture water against hydroponic root pathogens. Oral presentation at Aquaculture Europe 2017 meeting, Dubrovnik, Croatia
Sugita H, Nakamura H, Shimada T (2005) Microbial communities associated with filter materials in recirculating aquaculture systems of freshwater fish. Aquaculture 243:403–409. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.09.028
Sutton JC, Sopher CR, Owen-Going TN, Liu W, Grodzinski B, Hall JC, Benchimol RL (2006) Etiology and epidemiology of Pythium root rot in hydroponic crops: current knowledge and perspectives. Summa Phytopathol 32:307–321. https://doi.org/10.1590/S0100-54052006000400001
Takeda S, Kiyono M (1990) The characterisation of yellow substances accumulated in a closed recirculating system for fish culture. In: Proceedings of the second Asian fisheries forum, pp129–132
Tal Y, Watts JEM, Schreier SB, Sowers KR, Schreier HJ, Schreier HJ (2003) Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. Aquaculture 215:187–202
Thongkamngam T, Jaenaksorn T (2017) Fusarium oxysporum (F221-B) as biocontrol agent against plant pathogenic fungi in vitro and in hydroponics. Plant Prot Sci 53:85–95. https://doi.org/10.17221/59/2016-PPS
Timmons MB, Ebeling JM (2010) Recirculating aquaculture, 2nd edn. NRAC Publication, Ithaca Tu JC, Papadopoulos AP, Hao X, Zheng J (1999) The relationship of a pythium root rot and rhizosphere microorganisms in a closed circulating and an open system in stone

wool culture of tomato. Acta Hort (ISHS) 481:577–583
Vallance J, Déniel F, Le Floch G, Guérin-Dubrana L, Blancard D, Rey P (2010) Pathogenic and beneficial microorganisms in soilless cultures. Agron Sustain Dev 31:191–203. https://doi.org/10.1051/agro/2010018
Van Der Gaag DJ, Wever G (2005) Conduciveness of different soilless growing media to Pythium root and crown rot of cucumber under near-commercial conditions. Eur J Plant Pathol 112:31–41. https://doi.org/10.1007/s10658-005-1049-7
Van Os EA (2009) Comparison of some chemical and non-chemical treatments to disinfect a recirculating nutrient solution. Acta Hortic 843:229–234
Van Os EA, Amsing JJ, Van Kuik AJ, Willers H (1999) Slow sand filtration: a potential method for the elimination of pathogens and nematodes in recirculating nutrient solutions from glasshouse- grown crops. Acta Hortic 481:519–526
van Os EA, Bruins M, Wohanka W, Seidel R (2001) Slow filtration: a technique to minimise the risks of spreading root-infecting pathogens in closed hydroponic systems. In: International symposium on protected cultivation in mild winter climates: current trends for sustainable techniques, pp 495–502
Veresoglou SD, Barto EK, Menexes G, Rillig MC (2013) Fertilization affects severity of disease caused by fungal plant pathogens. Plant Pathol 62:961–969. https://doi.org/10.1111/ppa.12014
Verma S, Daverey A, Sharma A (2017) Slow sand filtration for water and wastewater treatment – a review. Environ Technol Rev 6:47–58. https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1278278
Villarroel M, Junge R, Komives T, König B, Plaza I, Bittsánszky A, Joly A (2016) Survey of aquaponics in Europe. Water (Switzerland) 8:3–9. https://doi.org/10.3390/w8100468
Waechter-Kristensen B, Sundin P, Gertsson UE, Hultberg M, Khalil S, Jensen P, Berkelmann- Loehnertz B, Wohanka W (1997) Management of microbial factors in the rhizosphere and nutrient solution of hydroponically grown tomato. Acta Hortic. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.450.40
Waechter-Kristensen B, Caspersen S, Adalsteinsson S, Sundin P, Jensén P (1999) Organic com- pounds and micro-organisms in closed, hydroponic culture: occurrence and effects on plant growth and mineral nutrition. Acta Hortic 481:197–204
Whipps JM (2001) Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere. J Exp Bot 52:487–511. https://doi.org/10.1093/jexbot/52.suppl_1.487
Wielgosz ZJ, Anderson TS, Timmons MB (2017) Microbial effects on the production of

aquaponically Grown Lettuce. Horticulturae 3:46. https://doi.org/10.3390/horticulturae3030046

Willey JM, Sherwood LM, Woolverton CJ (2008) Prescott, Harley, & Klein's micobiology, 7th edn. McGrawHill Higher Education, New York

Wohanka W (1995) Disinfection of recirculating nutrient solutions by slow sand filtration. Acta Hortic. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.382.28

Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Liang S, Wang J, Yan R (2016) Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. Environ Sci Pollut Res 23:6671–6679. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5898-0

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 15

SMARTHOODS: MICROREDES INTEGRADAS DE ACUAPONÍA

Florijn de Graaf and Simon Goddek

Capítulo 15

SMARTHOODS: MICROREDES INTEGRADAS DE ACUAPONÍA

Florijn de Graaf and Simon Goddek

Resumen

Con la creciente presión hacia la transición hacia un sistema de energía totalmente renovable, está surgiendo un nuevo tipo de arquitectura de sistema de energía: la microrred. Una microrred integra una multitud de tecnologías descentralizadas de energía renovable que utilizan sistemas inteligentes de gestión de energía, a fin de equilibrar de manera eficiente la producción local y el consumo de energía renovable, lo que resulta en un alto grado de flexibilidad y resistencia. En general, el rendimiento de una microrred aumenta con la cantidad de tecnologías presentes, aunque sigue siendo difícil crear una microrred totalmente autónoma dentro de una razón económica (de Graaf F, Nuevas estrategias para sistemas de energía descentralizados integrados inteligentes, 2018). Con el fin de mejorar la autosuficiencia y la flexibilidad de estas microrredes, esta investigación propone integrar una microrred de vecindario con una instalación de agricultura urbana que albergue una instalación de acuaponía de circuito múltiple desacoplada. Este nuevo concepto se llama Smarthood, donde todos los flujos de Alimentos, Agua y Energía están conectados circularmente. Al hacerlo, el rendimiento de la microrred mejora enormemente, debido a la alta flexibilidad presente dentro de la masa térmica, las bombas y los sistemas de iluminación. Como resultado, es posible lograr 95.38% de potencia y 100% de autosuficiencia térmica. Este resultado es prometedor, ya que podría allanar el camino hacia la realización de estos sistemas totalmente circulares y descentralizados de Alimentos, Agua y Energía.

Palabras clave: Redes inteligentes; Agricultura urbana; Microrredes; Blockchains; Autosuficiencia; Modelado del sistema energético

F. de Graaf (*)
Spectral, Amsterdam, The Netherlands
E-mail: florijn@spectral.energy
S. Goddek
Mathematical and Statistical Methods (Biometris), Wageningen University, Wageningen, The Netherlands
E-mail: simon.goddek@wur.nl; simon@goddek.nl

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_15

15.1 INTRODUCCIÓN

El cambio hacia un sistema de energía totalmente sostenible requerirá en parte pasar de un sistema de generación y distribución centralizado a un sistema descentralizado, debido al aumento de las tecnologías de generación de energía descentralizadas que usan radiación solar eólica y de techo. Además, la integración de los sectores de calor y transporte en el sistema eléctrico conducirá a un aumento muy significativo en la demanda máxima. Estos desarrollos requieren adaptaciones masivas y costosas a la infraestructura energética, mientras que se espera que la utilización de los activos de producción existentes caiga del 55% a 35% para 2035 (Strbac et al.2015). Esto plantea un gran desafío, pero también una oportunidad: si los flujos de energía se pueden equilibrar localmente en las microrredes, la demanda de costosas actualizaciones de infraestructura se puede minimizar, al tiempo que se proporciona estabilidad adicional a la red principal. Por estas razones, las "microrredes se han identificado como un componente clave de la red inteligente para mejorar la confiabilidad y calidad de la energía, aumentando la eficiencia energética del sistema" (Strbac et al. 2015).

Las microrredes pueden proporcionar autonomía y flexibilidad muy necesarias y, por lo tanto, es probable que desempeñen un papel importante en el sistema energético del futuro. Se estima que para 2050, más de la mitad de los hogares de la UE generarán su propia electricidad (Pudjianto et al. 2007). Por lo tanto, es necesario desbloquear recursos flexibles dentro de las microrredes para equilibrar la generación intermitente de energía renovable.

Los sistemas de agricultura urbana, como la acuaponía (dos Santos 2016), pueden proporcionar esta flexibilidad energética muy necesaria (Goddek y Körner 2019; Yogev et al. 2016). Las plantas pueden crecer dentro de una amplia gama de condiciones externas, ya que están acostumbradas a hacerlo en la naturaleza. Lo mismo se aplica a los peces en un sistema de acuicultura, que puede prosperar en un amplio rango de temperaturas. Estas condiciones de funcionamiento flexibles permiten un efecto de amortiguación en los requisitos de entrada de energía, lo que crea un alto grado de flexibilidad dentro del sistema. La alta masa térmica incorporada por el sistema de acuicultura permite almacenar grandes cantidades de calor dentro del sistema. Las luces se pueden encender y apagar dependiendo de la abundancia de electricidad, lo que permite reducir el exceso de generación de electricidad convirtiéndola en biomasa valiosa. Las bombas pueden funcionar en sincronía con los tiempos de generación de potencia máxima (p. Ej., Mediodía) para limitar la potencia máxima neta

(afeitado máximo). Las unidades de destilación óptimas (Capítulo 8) también tienen una demanda de calor muy flexible y pueden apagarse tan pronto como haya una sobreoferta de calor o electricidad (es decir, la bomba de calor convertiría la energía eléctrica en energía térmica). Todos estos aspectos hacen que los sistemas acuapónicos sean adecuados para proporcionar flexibilidad a una microrred.

Además de proporcionar flexibilidad en el consumo, se puede integrar aún más un sistema de acuaponía de circuito múltiple para proporcionar también flexibilidad en la producción. El biogás se produce como subproducto de UASB en las instalaciones de acuaponía.

Este biogás se puede quemar para producir calor y energía, incorporando un micro-CHP en la microrred. Por lo tanto, la integración de los sistemas acuapónicos dentro de las microrredes puede mejorar la flexibilidad energética tanto en el lado de la demanda como en el del suministro.

15.2 EL CONCEPTO DE SMARTHOODS

Para liberar todo el potencial del nexo Alimentos-Agua-Energía con respecto a las microrredes descentralizadas, un enfoque totalmente integrado se centra no solo en la energía (microrredes) y los alimentos (acuaponía) sino también en la utilización del ciclo del agua local. La integración de varios sistemas de agua (como la recolección de agua de lluvia, el almacenamiento y el tratamiento de aguas residuales) dentro de microrredes integradas por acuaponía produce el mayor potencial de eficiencia, resiliencia y circularidad. El concepto de una microrred de alimentos, agua y energía totalmente integrada y descentralizada se denominará a partir de ahora Smarthood (vecindario inteligente) y se representa en la figura 15.2.

El beneficio de implementar acuaponía en el concepto Smarthoods es su potencial para contribuir a optimizar los flujos integrados de nutrientes, energía y agua (Fig. 15.1). Este potencial de integración va mucho más allá de lo ya mencionado cruces entre los sistemas de energía y alimentos. Por ejemplo, las corrientes de desechos biodegradables que se producen pueden tratarse en reactores anaerobios (por ejemplo, UASB) y generar biogás y biofertilizante (Goddek et al. 2018). Incluso el lodo residual desmineralizado puede utilizarse como estiércol líquido en tierras de cultivo convencionales.

Aunque un enfoque holístico de los sistemas urbanos FWE, como los conceptos de Smarthoods, produce muchos beneficios, la integración de

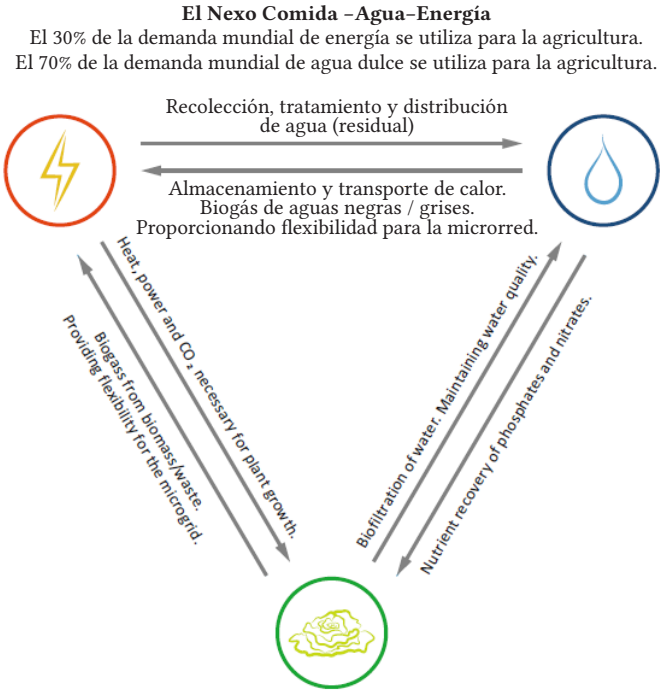


Fig. 15.1 El nexo Alimentos-Agua-Energía muestra la interacción entre energía, agua y producción de alimentos (basado en IRENA 2015).

los sistemas de acuaponía dentro de las microrredes siguen siendo muy dependiente de los casos. Los sistemas de producción de alimentos en acuaponía se caracterizan por un mayor rendimiento y una menor huella de agua, nutrientes y energía que los sistemas agrícolas convencionales; sin embargo, también son más costosos de construir. Por lo tanto, son más adecuados en ubicaciones que requieren altos rendimientos debido, por ejemplo, a limitaciones de espacio. En áreas urbanas densas, puede que no siempre haya suficiente espacio para construir una instalación de acuaponía, mientras que para las áreas rurales el costo de la tierra puede ser demasiado bajo como para justificar la construcción de una instalación de acuaponía de última generación; una instalación agrícola estándar con menores costos de financiamiento y rendimiento será más adecuada en tales casos. El caso de uso más óptimo para una instalación hidropónica integrada es aquel en el que hay suficiente espacio disponible y se requiere un alto rendimiento por área para compensar el costo del uso de la tierra. Por lo tanto, los vecindarios suburbanos y otras áreas urbanas (por ejemplo, un almacén abandonado) son más propensos para instalar la primera implementación de microrredes integradas con una instalación acuapónica (ver Ejemplo 15.1).

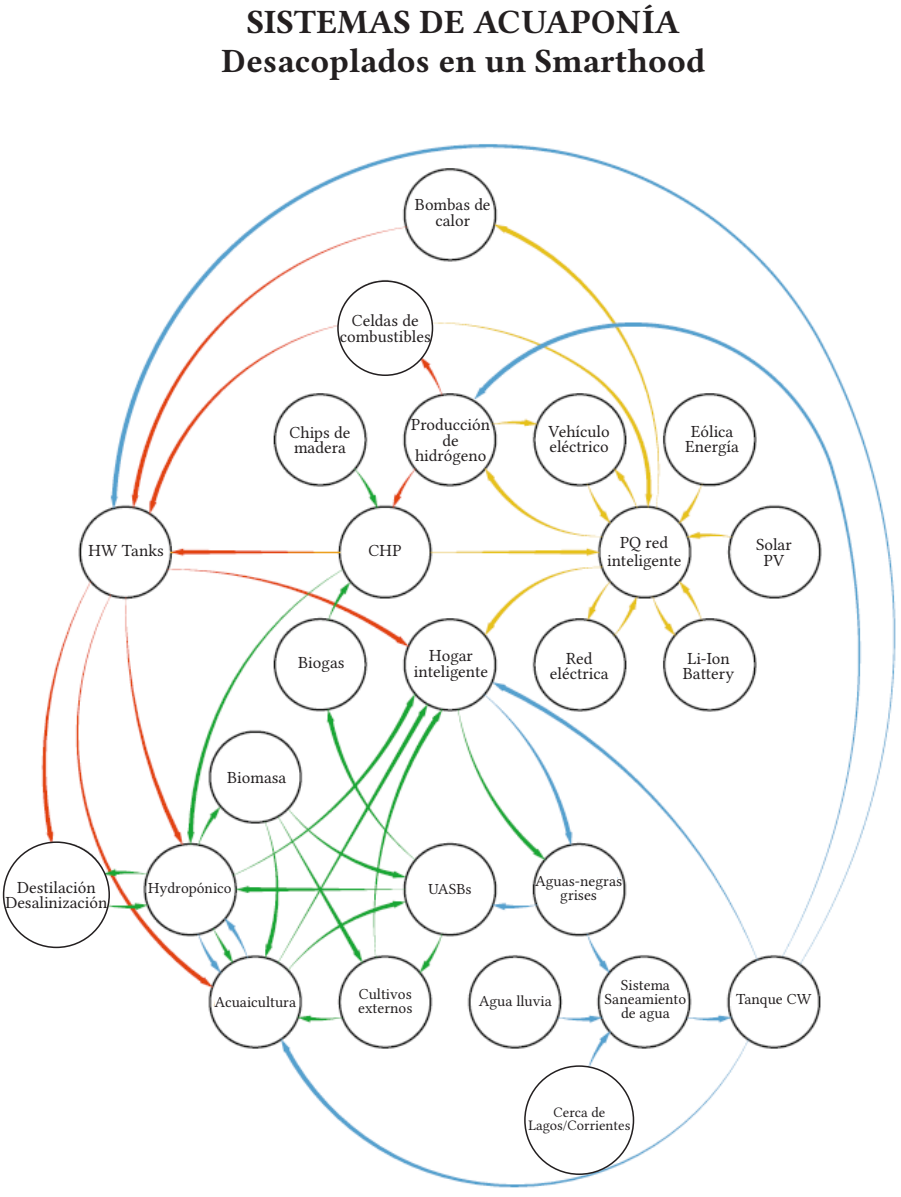


Fig. 15.2 La integración de los sistemas de acuaponía desacoplados (como se describe en el Capítulo 8) en un entorno local descentralizado diseñado para el concepto Smarthoods. Las flechas verdes muestran hasta qué punto un sistema de acuaponía puede interactuar con el sistema general. Las flechas rojas representan los flujos de calor, las flechas azules fluyen del agua y las flechas amarillas fluyen de energía.

Ejemplo 15.1
Un ejemplo temprano de un desarrollo urbano integrado de microrred acuaponía es *De Ceuvel*, un astillero previamente abandonado en Amsterdam-Norte que se ha convertido en un espacio de oficinas y centro recreativo autosuficientes. *De Ceuvel* sirve como banco de pruebas para nuevas tecnologías y políticas destinadas a crear una economía circular. Cuenta con una microrred totalmente eléctrica que incluye energía solar fotovoltaica, bombas de calor y comercio de energía entre pares a través de la cadena de bloques utilizando su propia ficha de energía: la *Jouliette*.[1] Una pequeña instalación acuapónica produce hierbas y verduras para el restaurante del hotel. El mismo restaurante utiliza biogás extraído de los desechos orgánicos producidos localmente para sus actividades de cocina, así como la calefacción de espacios. Además, hay un laboratorio presente que se utiliza para analizar la calidad del agua y extraer fosfatos y nitratos.

Aunque *De Ceuvel* actualmente no está utilizando activamente la instalación de acuaponía para aumentar la flexibilidad de su microrred, se están instalando sensores para monitorear los flujos de energía y nutrientes para evaluar su desempeño. Estos datos se utilizarán para ayudar en el desarrollo de nuevas y más inteligentes microrredes integradas de acuaponía urbana, como el concepto Smarthoods propuesto en este capítulo. Los primeros casos de uso encontrados en laboratorios de vida urbana como *De Ceuvel* son esenciales para el desarrollo exitoso del concepto Smarthoods (Fig. 15.3).

Fig. 15.3 Foto ilustrada de De Ceuvel (fuente: Metabolic - www.metabolic.n)

15.3 Objetivo

El objetivo de esta investigación es cuantificar el grado de autosuficiencia y flexibilidad para una microrred integrada con un sistema de acuaponía de circuito múltiple desacoplado.

[1] https://www.jouliette.net

15.4 Método

Se suponía que un vecindario de 50 hogares era un "Smarthood", con una instalación de acuaponía de múltiples bucles desacoplada que es capaz de proporcionar peces y vegetales a los 100 habitantes del Smarthood.

Para el modelado detallado de Smarthood, se utilizó un caso hipotético de referencia de un barrio suburbano de Amsterdam, que consta de 50 hogares (casas) con una ocupación promedio de 2 personas por hogar (100 personas en total). Además, una instalación de acuaponía urbana consta de un invernadero, un sistema de acuicultura, un UASB y una unidad de destilación. El dimensionamiento de los diferentes componentes está motivado por el uso de datos para un hogar holandés típico y un invernadero (ver Tabla 15.1).

15.4.1 El modelo del sistema energético

Se realizó un Modelo de Sistema de Energía (ESM) que puede simular los flujos de energía de una amplia gama de componentes, cuyas especificaciones principales se muestran en la Tabla 15.2. El ESM es capaz de calcular los flujos de energía para cada componente para cada hora del año.

El sistema de energía se modeló en MATLAB utilizando datos de perfil de

Tabla 15.1 Requisitos de alimentos y energía por persona / hogar en los Países Bajos

	Promedio (per capita/año)	Total (100 personas)	Fuente
Comida			
Consumo de vegetales (Países Bajos)	33 kg[a] (mientras se recomienda 73 kg)	7300 kg	EFSA (2018)
Área de invernadero requerida	Approx. 4 m^2	400 m^2	Estimado basado en min. recomendación de consumo
Consumo de pescado	20 kg	2000 kg	FAO (2015)
Volumen de acuicultura requerido[b]	0.2 m^3	20 m^3	Estimada
Energía			
Consumo de electricidad doméstica (Países Bajos)	3000 kWh_e/casa/año	150 MWh_e/year	CBS (2018)
Consumo de calor doméstico (Países Bajos)	6500 kWh_{th}/casa/año	325 MWh_{th}/year	CBS (2018)
Consumo de electricidad RAS	0.05–0.15 kW_e/m^3	1–3 kW_e 8,76–28,26 MWh_e/year	(Espinal, comunicación personal)

[a]El holandés promedio come 50 kg de vegetales por año. Sin embargo, solo 33 kg de hortalizas que pueden cultivarse en sistemas hidropónicos, que son hortalizas de fructificación 31.87 g/día, hortalizas de brassica 22.11 g/día, hortalizas de hoja 12.57 g/día, hortalizas de leguminosas 19.74 g/día, hortalizas de tallo 4.29 g/día. [b]Considerando un máximo. densidad de peces de 80 kg/m^3

Tabla 15.2 Componentes de producción

Componente	Tamaño	Especificaciones
Solar PV	40 kWp,e	Eta: 0.15
Turbina de viento urbana	20 kWp,e	Eta: 0.33
Bomba de Calor	10 kWp,e	COP: 4.0
CHP	20 kWp,e	Etael: 0.24, Etath¼ 0.61
Pila de Combustible	10 kWp,e	Eta: 0.55
Electrolizador	20 kWp,e	Eta: 0.45
Bateria	200 kWh	Eta: 0.90
Tanque de Agua caliente	930 kWh	40–60 C
Tanque de Hidrogeno	1000 kWh	30 kg of H2 storage

energía para Amsterdam obtenidos a través de DesignBuilder. El modelo numérico de series de tiempo incorpora una amplia selección de tecnologías energéticas, enumeradas en la Tabla 15.2 con sus especificaciones relevantes (Fig. 15.4).

El modelo de sistema de energía (ESM) utiliza declaraciones condicionales simples para el proceso de toma de decisiones, es decir, es un sistema de control basado en reglas. En la versión actual de este modelo, el control está centralizado, con el objetivo del autoconsumo maximización para el sistema en su conjunto (en una versión futura, la arquitectura de control estará descentralizada, ver sección 15.5). Las declaraciones condicionales para lograr esto se pueden establecer de la siguiente manera:

1. Mantenga el almacenamiento de calor al mínimo.
2. Pronostique la producción y consumo de electricidad flexible previsto.

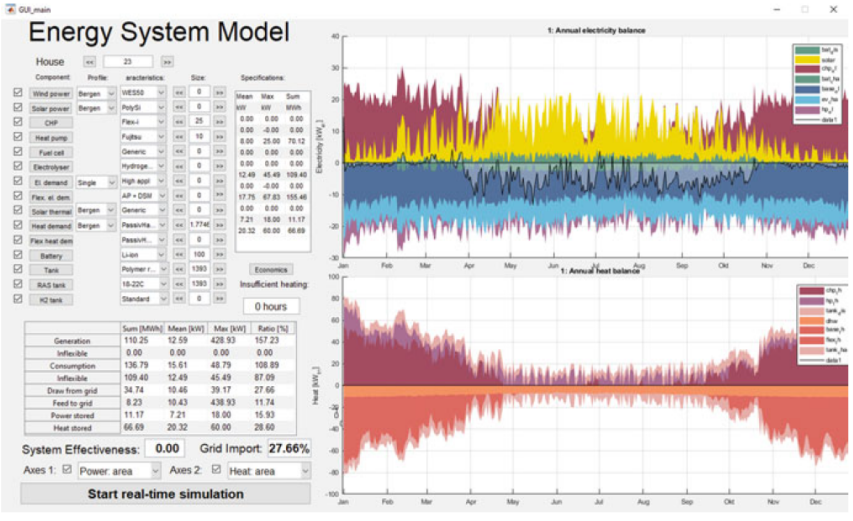


Fig. 15.4 El modelo de microrred acuaponía (F. de Graaf 2018), que muestra los equilibrios de energía para potencia (diagrama superior) y calor (diagrama inferior) para el caso de referencia (Amsterdam).

3. (a) Si la batería está llena, encienda el consumo flexible.
   (b) Si la batería estará vacía, encienda la generación flexible.

Al mantener el almacenamiento de calor al mínimo, el amortiguador para el equilibrio de energía flexible se maximiza. Si hay una sobreproducción de electricidad flexible (es decir, producción de electricidad que no puede programarse o controlarse flexiblemente, como la energía solar o eólica), la bomba de calor puede encenderse para crear un amortiguador proporcionado por el almacenamiento de agua caliente y la masa térmica del Sistema acuapónico RAS. Por el contrario, si hay una producción insuficiente de electricidad, se puede encender la generación flexible, como el CHP y la pila de combustible, utilizando así la capacidad de almacenamiento térmico. Tanto para el calor como para la energía, el balance energético es equivalente a

$$P_{gen,flex} + P_{gen,inflex} + P_{grid} = P_{cons,inflex} + P_{cons,\ flex} + P_{storage} \qquad (15.1)$$

Las generaciones flexibles incluyen la bomba de calor, la unidad combinada de calor y energía (CHP), la pila de combustible, la batería y los dispositivos inteligentes / flexibles (por ejemplo, bombas acuapónicas). La energía eólica, la energía solar fotovoltaica (FV) y los colectores solares se clasifican como generación flexible. Los dispositivos no flexibles constituyen la mayor parte del consumo de electricidad, especialmente en invierno (debido a la necesidad de iluminación instantánea) (Fig. 15.5).

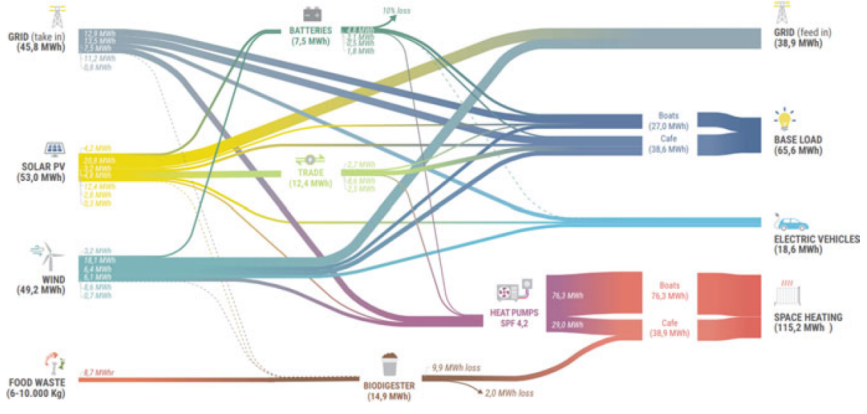


Fig. 15.5 Ejemplo de los flujos de energía (diagrama de Sankey) de una posible configuración integrada de microrredes en De Ceuvel (de Graaf 2018), que incluye un biodigestor para la producción de biogás. Esta configuración particular no incluye la unidad combinada de calor y energía que está presente dentro del concepto Smarthood, ni tiene en cuenta una gran instalación de acuaponía.

15.5 RESULTADOS

El consumo eléctrico y térmico total tanto de las casas como de las instalaciones de invernadero acuapónico (modelado a partir de los datos de las Tablas 15.1 y 15.2) se muestra en la Tabla 15.3. La instalación de invernadero acuapónico es responsable del 38,3% del consumo de energía y del 51,4% del consumo de calor. La demanda de energía para una instalación de acuaponía integrada en una microrred residencial es, por lo tanto, un poco más de un tercio de la demanda total de energía local, dado que toda la producción residencial de energía y vegetales / pescado se realiza localmente. La demanda de calor comprende aproximadamente el 50% de la demanda de calor total, que puede atribuirse en gran parte a la unidad de destilación que funciona con agua a alta temperatura.

Como se puede ver en las Figs. 15.4 y 15.6, el sistema de energía Smarthoods es capaz de equilibrar la producción y la demanda la mayor parte del tiempo. La participación total de la electricidad importada de la red es del 4,62% para el caso de referencia. A veces, se puede observar un ligero desequilibrio de poder, que se puede atribuir al control subóptimo de la versión actual del modelo en su mayor parte. El CHP, por ejemplo, cambia de estado encendido a apagado varias veces en el transcurso de varias horas, lo que resulta en una producción excesiva de electricidad. Tal comportamiento no ocurrirá para un sistema de control más optimizado, ya que el CHP puede reducirse en coordinación con la bomba de calor para entregar la cantidad precisa de electricidad y calor necesarios.

15.5.1 Flexibilidad

El sistema es altamente flexible como resultado del CHP y la instalación de acuaponía con su iluminación y bombas flexibles, y su alta capacidad de amortiguación térmica, así como la Batería y el sistema de hidrogeno. El sistema acuapónico, especialmente, aumenta en gran medida la flexibilidad general del sistema, ya que puede funcionar para una amplia gama de entrada de energía, como se puede deducir de la Tabla 15.4. Como resultado de esta flexibilidad, el sistema logra alcanzar la autosuficiencia energética casi total (95,38%) y la autosuficiencia térmica 100%.

15.6 DISCUSIÓN

Autosuficiencia: El sistema de energía propuesto para el concepto Smarthood es capaz de lograr una independencia casi total de la red mediante el uso de la flexibilidad proporcionada por los diversos componentes del sistema. El sistema acuapónico, especialmente, tiene un efecto

Tabla 15.3 Carga eléctrica y térmica para diferentes aspectos de la microrred.

	Residencial	**Instalación acuapónica**
Demanda media electrica	17.2 kW	10.2 kW
Demanda pico electrico	47.6 kW_p	15.2 kW_p
Demanda total electrica	**143.2 MW_h/año**	**89.2 MW_h/año**
Demanda termica promedio	37.1 kW	39.3 kW
Demanda pico termal	148.4 kW	121.2 kW
Demanda total termica	**325.0 MWh_{th}/año**	**344.2 MWh_{th}/año**

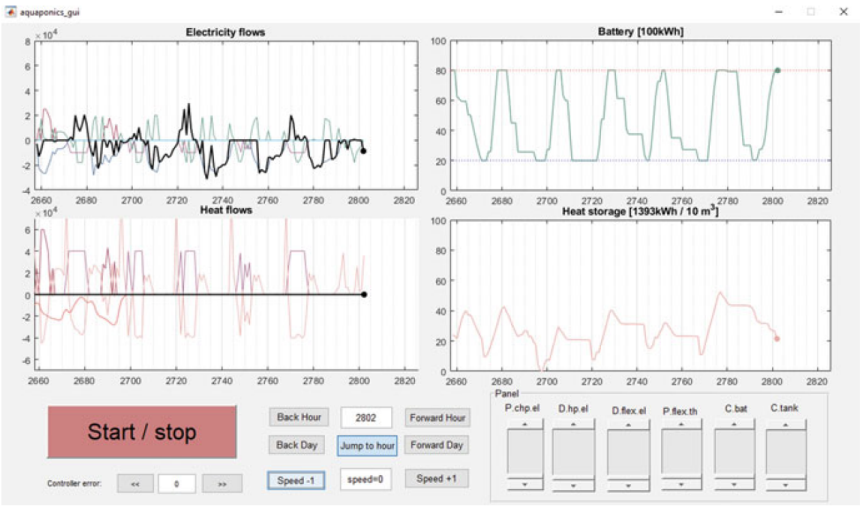


Fig. 15.6 Diagramas gráficos de series temporales para los balances de energía (arriba a la izquierda) y calor (abajo a la izquierda) (en W) del sistema Smarthood. La capacidad de almacenamiento (en kWh) se indica en el lado derecho para energía (arriba a la derecha) y calor (abajo a la derecha). El eje x representa el número de horas desde el comienzo del año. La línea negra representa el desequilibrio de energía.

positivo sobre la flexibilidad general del sistema. Con un 95,38% de autosuficiencia energética, este sistema funciona mejor que cualquier otro sistema económicamente factible evaluado en investigaciones anteriores (de Graaf 2018).

La Arquitectura de control facilita una economía energética local descentralizada, como la propuesta en el concepto Smarthoods, requiere una plataforma que haga un seguimiento de todas las transacciones entre pares que ocurren dentro del vecindario. La red de igual a igual correspondiente se puede clasificar como un enfoque de sistema de múltiples agentes (MAS), en el que múltiples nodos (por ejemplo, hogares o edificios de servicios públicos) funcionan como agentes independientes con su propio objetivo (por ejemplo, minimizar el costo o maximizar el ahorro de energía) y el correspondiente proceso de toma de decisiones. Tal enfoque descentralizado de toma de decisiones de múltiples agentes es necesario

debido a la complejidad del sistema. Simplemente hay demasiada información y demasiadas variables para el cálculo de una arquitectura de control jerárquica, de arriba hacia abajo y centralizada.

Blockchain Una arquitectura de control de sistema de múltiples agentes basada en blockchain podría proporcionar el marco necesario para acomodar una red descentralizada de igual a igual. Una gran cantidad de nodos distribuidos garantizan la estabilidad y la seguridad de la red, y se puede utilizar una alternativa a la minería: Acuñacion. Con la acuñación, las fichas / monedas se generan en función de los datos proporcionados por un dispositivo del mundo real, como un medidor de energía inteligente. Siempre que se pueda confiar en estas fuentes de información, es decir, que estos dispositivos puedan ser a prueba de manipulaciones indebidas, se puede crear un libro mayor seguro e independiente en el que varias partes interesadas puedan intercambiar bienes (por ejemplo, electricidad) y servicios (por ejemplo, gestión del lado de la demanda). Mediante el uso de contratos inteligentes, se pueden programar servicios complejos como el comercio de flexibilidad en la arquitectura de control del sistema. Internet de las cosas los componentes constitutivos del sistema Smarthood, como las bombas de calor, la iluminación de invernaderos o el UASB, se pueden controlar mediante sensores y actuadores conectados a Internet, conocidos como Internet de las cosas. Una red de sensores IoT permite la adquisi-

Tabla 15.4 Demanda flexible del sistema acuapónico

Componente	Orden de magnitud	Flexibilidad
Zapatillas	0.05–0.15 kW_eM^3 1–3 kW_e 8,76–28,26 MWh_e/año	No todas las bombas tienen que funcionar continuamente. Los procesos principales (control de oxígeno, control de amoníaco, control de CO_2, intercambio de tanques, control de sólidos suspendidos) deben ejecutarse continuamente. Los procesos más pequeños, como la dosificación del tampón de pH, las rutinas de retrolavado, los intercambios de agua o la oxigenación de respaldo, no tienen que ejecutarse continuamente
Encendiendo	80–150 W/m^2 Con un factor de capacidad de 10–20% esto lleva a 28–105 MWh_e/año kW_e	Las plantas necesitan ~ 4–6 h de oscuridad, el resto del día pueden encenderse artificialmente. Esto deja aprox. 0 (verano) a 12 (invierno) horas de iluminación adicional flexible
Calefacción de espacios (bajo piso) y tanque de acuacultura	444 kW_{th}/m^2/año 177,8 MWh_{th}/año	Debido a la alta masa térmica del piso de concreto y al gran volumen de agua en el tanque RAS, la carga de calor es extremadamente flexible
Unidad de destilación	50 kW_{th} MWh_e/año 166,4 MWh_{th}/año	La unidad de destilación funciona con agua caliente (70–90 C) y puede funcionar con un grado significativo de flexibilidad (MemSys 2017)

ción extensiva de datos, que van desde la concentración de nutrientes del tanque de peces hasta, por ejemplo, los ciclos de carga de la batería, todo por paso de tiempo. Estos datos se pueden usar para verificar el modelo numérico y optimizar el control dinámico del sistema. Inteligencia artificial la optimización del control del sistema Smarthood se puede hacer analizando los datos utilizando algoritmos de inteligencia artificial, como la programación genética (algoritmos evolutivos) o el aprendizaje por refuerzo automático. Con el aprendizaje por refuerzo automático, por ejemplo, un conjunto de acciones y su influencia en el entorno se pasan al algoritmo como argumentos de entrada, junto con el estado actual del sistema y una función acumulativa de objetivo / costo. Se puede implementar un proceso de toma de decisiones heurístico que mejora gradualmente en cada hogar que se adaptará dinámicamente a las situaciones para encontrar un programa de toma de decisiones casi óptimo que gestione los flujos de energía dentro de la casa y el Smarthood. Cada casa puede ejecutar dicho algoritmo y, como resultado, se puede crear una arquitectura de sistema de control multinodal, conocida como sistema de múltiples agentes (MAS), que es relativamente barata desde el punto de vista computacional (en comparación con el control centralizado), y cerca del óptimo. Barreras legales de naturaleza altamente innovadora de varios aspectos del concepto Smarthood, como la microrred de poligeneración, el sistema de acuaponía de múltiples bucles y los requisitos de planificación urbana no convencionales, trae consigo un conjunto único de desafíos a superar. Para muchos de estos desafíos, el marco regulatorio actual es insuficiente para acomodar los desarrollos propuestos en el concepto Smarthoods.

Las microrredes, por ejemplo, funcionan mejor cuando hay un mercado local en el que varios prosumidores (consumidores que producen energía simultáneamente) pueden participar en el comercio de energía entre pares sin fricción en un mercado libre. Las fuerzas del mercado entonces trabajarán para crear un mercado local de energía en el cual el precio de la energía fluctuante resulte de la oferta y la demanda local. En consecuencia, esta fluctuación de precios incentivará soluciones energéticas inteligentes como el almacenamiento de energía, la gestión del lado de la demanda o la generación de energía flexible. En la mayoría de los países de la UE, un mercado local libre es actualmente imposible debido a las regulaciones; los impuestos deben pagarse por cada kWh que pasa por el medidor de electricidad, el precio de la electricidad para los consumidores está fijo y los prosumidores no pueden participar en el mercado de la energía sin la intervención de un tercero llamado agregador. Con el aumento esperado en el desarrollo de proyectos de microrredes, los reguladores tendrán que encontrar formas de facilitar los mercados energéticos locales para desbloquear todo el potencial de las microrredes altamente integradas (ver

Ejemplo 15.2).

15.7 CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue cuantificar el grado de flexibilidad y autosuficiencia que puede proporcionar una microrred integrada de acuaponía. Para obtener esta respuesta, se supuso que un vecindario de 50 hogares era un "Smarthood", con una instalación de acuaponía de múltiples bucles desacoplada que es capaz de proporcionar peces y vegetales a los 100 habitantes del Smarthood.

Los resultados son prometedores: gracias al alto grado de flexibilidad inherente al sistema acuapónico como resultado de la alta masa térmica, las bombas flexibles y la iluminación adaptativa, el grado general de autosuficiencia es del 95,38%, lo que lo hace casi completamente autosuficiente y rejilla independiente. Dado que el sistema de acuaponía es responsable del 38,3% del consumo de energía y del 51,4% del consumo de calor, el impacto de la instalación de acuaponía en el balance energético total del sistema es muy alto.

Investigaciones anteriores (de Graaf 2018) han indicado que es muy difícil alcanzar niveles de autoconsumo superiores al 60% sin depender de una fuente de biomasa externa para impulsar un CHP. Incluso con esta fuente incluida, el autoconsumo máximo tecnológicamente factible no superó el 89%. En Smarthood, los insumos de biomasa para el CHP se derivan parcialmente del propio sistema acuapónico y del reciclaje de aguas grises y negras. Un mayor autoconsumo combinado con una menor dependencia de los insumos externos de biomasa, y un autoconsumo resultante del 95%,

Ejemplo 15.2
Un avance reciente dentro del marco regulatorio en los Países Bajos es la introducción de la experimentación regeling, una ley experimental que permite que un pequeño número de proyectos cuidadosamente seleccionados (como de Ceuvel, ejemplo Z.1) permitan a las cooperativas de energía convertirse en su propio sistema de distribución operador, como si estuvieran detrás de una conexión de un solo medidor. Esta ley es indicativa de la conciencia entre los organismos reguladores holandeses de las barreras legales mencionadas anteriormente y, por lo tanto, lo más probable es que conduzca a la revisión de la ley de electricidad actual en un futuro cercano para acomodar mejor los desarrollos de microrred.

También existen algunas barreras legales en la mayoría de los países de la UE con respecto a la reutilización de aguas negras tratadas para la producción de peces y plantas, ya que debe garantizarse que los patógenos humanos se eliminen por completo. Se puede encontrar más información sobre el marco legal de la acuaponía en el cap. 20).

hace que la microrred integrada en acuaponía funcione mejor desde el punto de vista de la autosuficiencia que cualquier otra microrred renovable conocida por los autores.

Los autores de este capítulo, por lo tanto, creen firmemente que, con suficiente experimentación, la integración de los sistemas de invernadero acuapónico dentro de las microrredes produce un gran potencial para crear sistemas de alimentos, agua y energía altamente autosuficientes a nivel local.

REFERENCIAS

CBS (2018) Energieverbruik particuliere woningen; woningtype en regio's [WWW Document]. URL http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?VW¼T&DM¼SLNL&PA¼81528NED&D1¼a&D2¼a&D3¼0&D4¼a&HD¼161202-1617&HDR¼T,G3&STB¼G2,G1. Accessed19 Oct 2018

de Graaf F (2018) New strategies for smart integrated decentralised energy systems

dos Santos MJPL (2016) Smart cities and urban areas—aquaponics as innovative urban agriculture. Urban For Urban Green 20:402–406. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.004

EFSA (2018) The EFSA comprehensive European food consumption database | European [WWW Document]. URL https://www.efsa.europa.eu/en/food-consumption/comprehensive-database. Accessed 19 Oct 2018

FAO (2015) Statistical pocketbook - world food and agriculture

Goddek S, Körner O (2019) A fully integrated simulation model of multi-loop aquaponics: a case study for system sizing in different environments. Agric Syst 171:143–154

Goddek S, Delaide BPL, Joyce A, Wuertz S, Jijakli MH, Gross A, Eding EH, Bläser I, Reuter M, Keizer LCP, Morgenstern R, Körner O, Verreth J, Keesman KJ (2018) Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. Aquac Eng 83:10–19. https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.07.003

IRENA (2015) Renewable energy capacity statistics 2015, Masdar: IRENA MemSys (2017) Membrane distillation system - MDS 500

Pudjianto D, Ramsay C, Strbac G (2007) Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. IET Renew Power Gener 1:10. https://doi.org/10.1049/iet-rpg:20060023

Strbac G, Hatziargyriou N, Lopes JP, Moreira C, Dimeas A, Papadaskalopoulos D (2015) Microgrids: enhancing the resilience of the

European megagrid. IEEE Power Energ Mag 13:35–43. https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397336

Yogev U, Barnes A, Gross A (2016) Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid. Aquaponics Water 8:589. https://doi.org/10.3390/W8120589

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 16

ACUAPONÍA PARA EL ANTROPOCENO: HACIA UNA AGENDA DE "SOSTENIBILIDAD PRIMERO"

James Gott, Rolf Morgenstern, and Maja Turnšek

Capítulo 16

ACUAPONÍA PARA EL ANTROPOCENO: HACIA UNA AGENDA DE "SOSTENIBILIDAD PRIMERO"

James Gott, Rolf Morgenstern, and Maja Turnšek

Resumen

'El Antropoceno' ha surgido como un momento único en la historia de la Tierra donde la humanidad reconoce su capacidad devastadora para desestabilizar los procesos planetarios de los que depende. La agricultura moderna juega un papel central en esta problemática. Se necesitan innovaciones en la producción de alimentos que superen los paradigmas tradicionales de la Revolución Verde y que al mismo tiempo puedan reconocer la complejidad que surge de los problemas de sostenibilidad y seguridad alimentaria que marcan nuestros tiempos. Acuaponia es una innovación tecnológica que promete contribuir mucho a estos imperativos. Pero este campo emergente se encuentra en una etapa temprana que se caracteriza por los recursos limitados, la incertidumbre del mercado, la resistencia institucional y los altos riesgos de fracaso, un entorno de desarrollo en el que prevalece la exageración sobre los resultados demostrados. Dada esta situación, la comunidad de investigación en acuaponia ocupa un lugar importante en el camino de desarrollo de esta tecnología. Pero el campo necesita crear una visión coherente y viable para esta tecnología que pueda ir más allá de las cuentas mas optimistas del optimismo. En cuanto a la ciencia de la sostenibilidad y la investigación STS, discutimos la necesidad urgente de desarrollar lo que llamamos un 'conocimiento crítico de sostenibilidad' para acuaponia, dando sugerencias sobre posibles caminos a seguir, que incluyen (1) expandir la investigación acuaponica en un dominio de investigación interdisciplinaria, (2) abriendo la investigación a enfoques participativos en contextos del mundo real y (3) buscando un

J. Goot (*)
Geography and Environment, University of Southampton, Southampton, UK
e-mail: j.gott@soton.ac.uk
R. Morgenstern
Department of Agriculture, University of Applied Sciences of South Westphalia, Soest, Germany
e-mail: morgenstern.rolf@fh-swf.de
M. Turnšek
Faculty of Tourism, University of Maribor, Brežice, Slovenia
e-mail: maja.turnsek@um.si

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_16

enfoque orientado a la solución para resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

Palabras clave: Antropoceno, Revolución verde, Tecno-optimismo; Investigación STS (Investigación en ciencia, tecnología y sociedad)

16.1 INTRODUCCIÓN

Los impulsores clave declarados para la investigación acuaponica son los desafíos ambientales, sociales y económicos globales identificados por autoridades supranacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) de las Naciones Unidas (ONU) (DESA 2015), cuyos llamados a una producción de alimentos sostenibles y estables promueven ´la necesidad de soluciones nuevas y mejoradas para la producción y el consumo de alimentos '(1) (Junge et al.2017; Konig et al.2016). Hay un reconocimiento creciente de que los modos de producción agrícola actuales causan un consumo excesivo de recursos ambientales, dependen de combustibles fósiles cada vez más escasos y caros, exacerban la contaminación ambiental y, en última instancia, contribuyen al cambio climático (Pearson 2007). En nuestro tiempo del "pico de todo" (Cohen 2012), "lo de siempre" para nuestro sistema alimentario parece estar reñido con un suministro sostenible y justo de alimentos (Fischer et al. 2007). Se necesita con urgencia una revolución en el sistema alimentario (Kiers et al. 2008; Foley et al. 2011), y como lo atestiguan los capítulos iniciales (Capítulos 1 y 2) de este libro, la tecnología de acuaponia es muy prometedora. Los sistemas cerrados de acuaponia ofrecen una convergencia especialmente atractiva de posibles resoluciones que podrían contribuir a un futuro más sostenible (Kőmíves y Ranka 2015). Pero, preguntamos, ¿a qué tipo de futuro sostenible podría contribuir la investigación en acuaponia y la tecnología de acuaponia? En este capítulo, damos un paso atrás para considerar las ambiciones de nuestra investigación y las funciones de nuestra tecnología.

En este capítulo situamos la investigación acuaponica actual dentro de los cambios de perspectiva a mayor escala que ocurren en las ciencias y más allá debido a la problemática que se conoce como "el Antropoceno" (Crutzen y Stoermer 2000b). Expandiéndose mucho más allá de los confines de su formulación geológica original (Lorimer 2017), el concepto Antropoceno se ha convertido en nada menos que "la narrativa maestra de nuestros tiempos" (Hamilton et al. 2015). Representa una realización urgente que exige preguntas profundas sobre la forma en que la sociedad se organiza y se relaciona con el mundo, incluido el modus operandi de nuestra investigación (Castree 2015). Sin embargo, hasta ahora, el concep-

to se ha dejado de lado en la literatura acuaponica. Este capítulo presenta el Antropoceno como un marco de referencia obligatorio que debe reconocerse para cualquier esfuerzo concertado hacia la seguridad alimentaria y la sostenibilidad en el futuro.

Discutimos cómo el Antropoceno perturba algunos principios clave que han sustentado la agroeciencia tradicional de la Revolución Verde (Stengers 2018) y cómo esto trae desafíos y oportunidades para la investigación acuaponica. Acuaponia es una innovación que promete contribuir mucho a los imperativos de la sostenibilidad y la seguridad alimentaria. Pero este campo emergente se encuentra en una etapa temprana que se caracteriza por los recursos limitados, la incertidumbre del mercado, la resistencia institucional con altos riesgos de fracaso y pocas historias de éxito, un entorno de innovación donde prevalece la publicidad sobre los resultados demostrados (König et al.2018). Sugerimos que esta situación se caracteriza por un optimismo tecnológico fuera de lugar que no es propicio para los cambios más profundos hacia la sostenibilidad que se necesitan de nuestro sistema alimentario. Dado esto, creemos que la comunidad de investigación en acuaponia tiene un papel importante que desempeñar en el desarrollo futuro de esta tecnología. Sugerimos un reenfoque de la investigación en acuaponia en torno a las demandas clave de nuestro sistema alimentario: sostenibilidad y seguridad alimentaria. Dicha tarea implica que consideremos más a fondo la naturaleza de la sostenibilidad, por lo que recurrimos a los conocimientos de los campos de la ciencia de la sostenibilidad y la sociedad STS.

Abordar la sostenibilidad en el Antropoceno obliga a la necesidad deatender de manera más integral las dimensiones biofísicas, sociales, económicas, legales y éticas que interactúan que invaden los sistemas acuaponicos (Geels 2011). Esta no es una tarea pequeña que impone grandes demandas en la forma en que producimos y usamos el conocimiento. Por esta razón, discutimos la necesidad de desarrollar lo que llamamos un 'conocimiento crítico de sostenibilidad' para acuaponia, dando sugerencias sobre posibles caminos a seguir, que incluyen (1) expandir la investigación acuaponica en un dominio de investigación interdisciplinaria, (2) abrir la investigación a la participación enfoques en contextos del mundo real y (3) siguiendo un enfoque orientado a soluciones para resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

16.2 EL ANTROPOCENO Y LA AGROCIENCIA

"Hoy, la humanidad ha comenzado a igualar e incluso superar algunas de las grandes fuerzas de la naturaleza [...] [El] Sistema de la Tierra se

encuentra ahora en una situación no análoga, mejor conocida como una nueva era en la historia geológica, el Antropoceno '(Oldfield et al. 2004: 81). La propuesta científica de que la Tierra ha entrado en una nueva época, "el Antropoceno", como resultado de las actividades humanas, fue presentada a comienzos del nuevo milenio por el químico y premio Nobel Paul Crutzen y el biólogo Eugene Stoermer (Crutzen y Stoermer 2000a) La creciente evidencia cuantitativa sugiere que los flujos de materiales antropogénicos derivados de la combustión de combustibles fósiles, la producción agrícola y la extracción de minerales ahora rivalizan en escala con aquellos flujos naturales que supuestamente ocurren fuera de la actividad humana (Steffen et al. 2015a). Este es un momento marcado por eventos climáticos, ambientales y ecológicos sin precedentes e impredecibles (Williams y Jackson 2007).

La era benigna del Holoceno ha pasado, por lo que la propuesta afirma; Ahora hemos entrado en un tiempo mucha mas impredecible y peligroso, donde la humanidad reconoce su capacidad devastadora para desestabilizar los procesos planetarios de los que depende (Rockström et al. 2009, Steffen et al. 2015b; Ver capítulo 1). Por lo tanto, el Antropoceno es un momento de realización, donde el alcance de las actividades humanas debe conciliarse dentro de los límites de los procesos biofísicos que definen el espacio operativo seguro de un sistema terrestre estable y resistente (Steffen et al. 2015b). Ver capítulo 1). Por lo tanto, el Antropoceno es un momento de realización, donde el alcance de las actividades humanas debe conciliarse dentro de los límites de los procesos biofísicos que definen el espacio operativo seguro de un sistema terrestre estable y resistente (Steffen et al. 2015b). Ha surgido un profundo entrelazamiento de los destinos de la naturaleza y la humanidad (Zalasiewicz et al. 2010).La creciente conciencia de la calamidad ambiental y humana, y nuestro papel tardío y enredado dentro de ella, pone a prueba nuestra fe en el supuesto modernista clave, es decir, los dualismos que separan a los humanos de la naturaleza (Hamtonton et al. 2015). Este es un momento impactante y sin precedentes porque las epistemologías modernistas han demostrado ser extremadamente poderosas, contribuyendo significativamente a la organización de la sociedad hasta nuestros días (Latour 1993). Concepciones de agencia humana única y estable, la presunción de normas progresivas como la libertad o la dignidad universal, y la existencia de un mundo objetivo separado de las acciones humanas (Latour 2015; Hamilton et al. 2015).

Esta idea, sin duda, se aplica al sistema alimentario que todos heredamos. La Revolución Verde1 fue apuntalada con aspiraciones modernas, fundada en ideas tales como nociones lineales de progreso, el poder de la razón

humana y la fe en la inevitable resolución tecnológica de los problemas humanos (Cota 2011). Estas concepciones, que tradicionalmente han asegurado el papel de la ciencia en la sociedad, comienzan a parecer cada vez menos confiables con el advenimiento del Antropoceno (Savransky 2013; Stengers 2015). La verdad incómoda es que las intervenciones tecnocientíficas, que se han implementado como soluciones agrarias modernas en nuestro mundo durante el siglo pasado, han traído consigo resultados serios e inesperados. Además, estas interrupciones biofísicas crecientes (por ejemplo, emisiones de gases de efecto invernadero y nitrógeno y perturbaciones del ciclo del fósforo) que solo recientemente se han percibido deben agregarse a una serie mucho más amplia de repercusiones ambientales, biológicas y sociales provocadas por aspectos particulares de nuestro sistema alimentario modernizado.

La problemática del Antropoceno deja pocas dudas de que nuestro sistema alimentario contemporáneo enfrenta enormes desafíos (Kiers et al. 2008; Baulcombe et al. 2009; Pelletier and Tyedmers 2010). Estudios destacados señalan a la agricultura como el mayor contribuyente al aumento de los riesgos ambientales que plantea el Antropoceno (Struik y Kuyper 2014; Foley et al. 2011). La agricultura es el mayor usuario individual de agua dulce en el mundo (Postel 2003); el mayor contribuyente del mundo para alterar los ciclos globales de nitrógeno y fósforo y una fuente significativa (19-29%) de emisiones de gases de efecto invernadero (Vermeulen et al. 2012; Noordwijk 2014). En pocas palabras, "La agricultura es el principal impulsor del cambio global" (Rockström et al. 2017: 6).

[1]La Revolución Verde se refiere a un conjunto de iniciativas de investigación y transferencia de tecnología que ocurrieron desde la década de 1930 y finales de la década de 1960 que aumentaron la producción agrícola en todo el mundo, particularmente en el mundo en desarrollo. Como describe Farmer (1986), estas iniciativas dieron como resultado la adopción de nuevas tecnologías, que incluyen: 'Nuevas variedades de cereales de alto rendimiento... en asociación con fertilizantes químicos y agroquímicos, y con un suministro controlado de agua... y nuevos métodos de cultivo, incluida la mecanización. Todos estos juntos fueron vistos como un "paquete de prácticas" para reemplazar la tecnología "tradicional" y ser adoptados como un todo"

Y, sin embargo, es desde dentro de la nueva época del Antropoceno que debe resolverse el desafío de alimentar a la humanidad. El número de personas hambrientas en el mundo persiste en aproximadamente 900 millones (FAO, Ifad y PMA. 2013). Incluso entonces, para alimentar al mundo en 2050, las mejores estimaciones sugieren que la producción debe duplicarse aproximadamente para mantenerse al ritmo de las demandas proyectadas del crecimiento de la población, los cambios en la dieta (en

particular el consumo de carne) y el aumento del uso de bioenergía (Kiers et al. 2008; Baulcombe et al. 2009; Pelletier y Tyedmers 2010; Kearney 2010). Para complicar aún más las cosas es la necesidad no solo de producir más, sino también de administrar todo el sistema alimentario de manera más eficiente.

En un mundo donde 2 mil millones sufren de deficiencias de micronutrientes, mientras que 1,4 mil millones de adultos están sobrealimentados, la necesidad de una mejor distribución, acceso y nutrición es evidente, al igual que la necesidad drástica de reducir los niveles deplorables de desechos (estimaciones conservadoras sugieren 30%) en la cadena de suministro de la granja a la mesa (Parfitt et al. 2010; Lundqvist et al. 2008; Stuart 2009).

La problemática del Antropoceno presenta serias preguntas sobre la agricultura industrial moderna, que en muchos aspectos ahora se considera ineficaz, destructiva e inadecuada para nuestra nueva situación global. Pero las consecuencias de esta situación son aún más considerables, ya que el Antropoceno plantea un desafío al paradigma agrícola que actualmente domina la provisión de alimentos (Rockström et al.2017). Por esta razón, el desafío se extiende mucho más allá de "la granja" e incorpora un conjunto mucho más amplio de estructuras, prácticas y creencias que continúan promulgando e impulsando el paradigma agrícola moderno en nuestra nueva época exigente. Con esto viene la urgente necesidad de reconsiderar los métodos y prácticas, ambiciones y objetivos que definen nuestra investigación actual en ciencias agrícolas. ¿Están preparados para los desafíos de nuestra nueva época, o simplemente reproducen visiones inadecuadas de la provisión de alimentos modernista?

16.3 MÁS ALLÁ DE LA REVOLUCIÓN VERDE

El Antropoceno marca un cambio radical en la relación entre los humanos y nuestro planeta. Exige un replanteamiento de los modos de producción actuales que actualmente nos impulsan en trayectorias insostenibles. Hasta ahora, tales compromisos reflexivos no han sido requeridos para la investigación y el desarrollo de la ciencia de la tierra. Vale la pena recordar que la Revolución Verde, tanto en sus ambiciones como en sus métodos, fue durante algún tiempo indiscutible; se intensificaría la agricultura y aumentaría la productividad por unidad de tierra o trabajo (Struik 2006). Sin duda, este proyecto, cuyas innovaciones tecnológicas fueron promovidas vigorosamente por gobiernos, empresas y fundaciones de todo el mundo (Evenson y Gollin 2003), fue fenomenalmente exitoso a gran escala. Más ecuaciones producidas con menos tiempo de trabajo promedio en el

sistema de productos básicos fue la ecuación que permitió la producción de los alimentos más baratos en la historia mundial (Moore 2015). Para simplificar, estandarizar y mecanizar la agricultura hacia aumentos en la productividad por trabajador, planta y animal, se tuvo que anular una serie de barreras biofísicas. La Revolución Verde logró esto principalmente a través de insumos no renovables.

En el Antropoceno, este paradigma agrícola que marcó la Revolución Verde la nación choca contra la historia (geológica). La conciencia cada vez mayor es que este modelo agrícola "artificializado", que sustituye cada vez más procesos ecológicos con insumos químicos finitos, riego y combustibles fósiles (Caron et al. 2014), literalmente socava los cimientos de la provisión de alimentos en el futuro. Las contradicciones biofísicas de la agricultura industrial del capitalismo tardío se han vuelto cada vez más notorias (Weis 2010). Además, las dramáticas consecuencias ambientales, económicas y sociales de los modelos contemporáneos de agricultura artificializada de alta intensidad se han convertido en una preocupación creciente para un sistema alimentario globalizado que manifiesta contradicciones aceleradas (Kearney 2010; Parfitt et al. 2010). Durante el período de posguerra (mediados de los años 40 y 70), el crecimiento económico seguro se basó en la extracción acelerada de combustibles fósiles, y como señala Cota (Cota 2011), el desarrollo de la agrociencia durante este tiempo progresó más en sintonía con la geoquímica que las ciencias de la vida. Producción agrícola diseñada en torno a los rendimientos máximos más baratos se había simplificado y unificado en monocultivos, que dependían de la mecanización y los productos agroquímicos. Aunque es altamente efectivo cuando se implementa por primera vez, la eficiencia de estos insumos comerciales ha sido testigo de rendimientos decrecientes (Moore 2015). Después de las crisis petroleras de los años 70, los ideales productivistas de la Revolución Verde recayeron más sobre las ciencias de la vida, en particular bajo el disfraz de la agrobiotecnología, que se ha convertido en una industria multimillonaria.

Alimentar a la creciente población del mundo ha sido la principal preocupación en una narrativa productivista de una década que ha servido para asegurar la posición prominente de la biotecnología agrícola en nuestro sistema alimentario actual (Hunter et al. 2017). La gran sorpresa es que este sector altamente avanzado ha hecho poco para mejorar los rendimientos intrínsecos. El crecimiento de la productividad agrícola mundial se desaceleró del 3% anual en la década de 1960 al 1.1% en la década de 1990 (Dobbs et al. 2011). Recientemente, los rendimientos de los cultivos clave en algunos lugares se han acercado a las mesetas en la producción (Grassini et al. 2013). Los agroecientíficos de la corriente principal han expresado

su preocupación de que el potencial de rendimiento máximo de las variedades actuales se está acercando rápidamente (Gurian-Sherman 2009). Además de esto, se estima que el cambio climático ya ha reducido los rendimientos mundiales de maíz y trigo en un 3,8% y 5.5%, respectivamente (Lobell et al. 2011), y algunos advierten sobre fuertes caídas en la productividad de los cultivos cuando las temperaturas exceden los umbrales fisiológicos críticos (Battisti y Naylor 2009).

La disminución en la eficiencia de los insumos artificiales agregados a los límites biológicos de las variedades tradicionales es una situación que, para algunos, subraya aún más la necesidad de acelerar el desarrollo de variedades genéticamente modificadas (Prado et al. 2014). Incluso entonces, los mayores defensores de los transgénicos, las propias empresas biotecnológicas, son conscientes de que las intervenciones genéticamente modificadas rara vez funcionan para aumentar el rendimiento, sino para mantenerlo mediante la resistencia a los pesticidas y herbicidas (Gurian-Sherman 2009). Como tal, la producción agrícola se ha encerrado en un ciclo que requiere el reemplazo constante de nuevas variedades de cultivos y paquetes de productos para superar los crecientes impactos negativos ambientales y biológicos sobre el rendimiento [2].

El análisis influyente de Melinda Cooper (2008: 19) de la agrobiotecnología ha rastreado cómo los modos de producción neoliberales se reubican cada vez más dentro de los niveles genéticos, moleculares y celulares. Como tal, la comercialización de los sistemas agrarios se extiende cada vez más hacia la captura de germoplasma y ADN, hacia la "vida misma" (Rose 2009). El diagnóstico de Cooper (2008) es que estamos viviendo en una era de delirio capitalista caracterizado por su intento de superar los límites biofísicos de nuestra tierra a través de la reinvención biotecnológica especulativa del futuro. A este respecto, algunos han argumentado que, en lugar de superar las debilidades del paradigma convencional, el enfoque limitado de las intervenciones GM parece intensificar sus características centrales (Altieri 2007). En medio de la desaceleración de los aumentos de rendimiento, los objetivos estimados de 60 a 100% de aumento en la producción necesaria para 2050 (Tilman et al. 2011; Alexandratos y Bruinsma 2012) parecen cada vez más desalentadores. Por convincentes y claros que puedan ser estos objetivos, se ha planteado la preocupación de que las narrativas productivistas hayan eclipsado otras preocupaciones apremiantes, a saber, la sostenibilidad ambiental de la producción (Hunter et al.2017) y la seguridad alimentaria (Lawrence et al.2013). El paradigma agrícola actual ha sostenido primero la producción y la sostenibilidad como una tarea secundaria de mitigación (Struik et al. 2014).

Treinta años de conversaciones de sostenibilidad frustradas dentro del paradigma productivista son testimonio de las graves dificultades que enfrentan los investigadores y los encargados de formular políticas para cerrar la brecha entre la teoría y la práctica de la sostenibilidad (Krueger y Gibbs 2007). La "sostenibilidad" como concepto había tenido inicialmente un potencial revolucionario. Textos clave como Los limites del crecimiento del Club de Roma (Meadows et al. 1972), por ejemplo, contenían una crítica inminente de las narrativas de desarrollo global. Pero los investigadores han señalado la forma en que la "sostenibilidad" a lo largo de los años 80 y los años 90 se asimilaron en el discurso del crecimiento neoliberal (Keil 2007). Ahora tenemos una situación en la que, por un lado, la sostenibilidad global se entiende casi por unanimidad como un requisito previo para lograr el desarrollo humano en todas las escalas, desde local, a ciudad, nación y el mundo (Folke et al. 2005), mientras que en el otro, a pesar de los esfuerzos sustanciales en muchos niveles de la sociedad hacia la creación de un futuro sostenible, los indicadores clave a escala global muestran que la humanidad se está alejando de la sostenibilidad en lugar de ir hacia ella (Fischer et al. 2007). Esto a pesar de la creciente regularidad de los informes de alto perfil que subrayan cada vez más los graves riesgos de las tendencias existentes para la viabilidad a largo plazo de los sistemas ecológicos, sociales y económicos (Steffen et al. 2006; Stocker 2014; Assessment 2003; Stern 2008) Esta situación, la brecha cada vez mayor entre nuestra trayectoria actual y todos los objetivos de sostenibilidad significativos, se ha discutido como la llamada "paradoja de la sostenibilidad" (Krueger y Gibbs 2007).

El discurso predominante sobre seguridad alimentaria y sostenibilidad continúa impulsando los imperativos de desarrollo orientados al crecimiento (Hunter et al. 2017). La investigación y el desarrollo de la agrociencia proliferaron de acuerdo con las estructuras político-económicas dominantes que definieron el desarrollo planetario en los últimos 30 años (Marzec 2014).

Aunque los efectos negativos de la llamada "Escuela de Chicago" del desarrollo ya han sido bien documentados (Harvey 2007), la innovación biotecnológica sigue enraizada en el discurso neoliberal (Cooper 2008). Estas narrativas presentan constantemente los mercados mundiales, la innovación biotecnológica y las iniciativas corporativas multinacionales como las condiciones previas estructurales para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad. La credibilidad empírica de tales afirmaciones ha sido cuestionada durante mucho tiempo (Sen 2001), pero parece especialmente relevante en medio de la historia acumulada de fallas crónicas de distribución y crisis alimentarias que marcan nuestros tiempos. Vale la pena

repetir el punto de Nally (2011; 49): 'El espectro del hambre en un mundo de abundancia parece que continuará en el siglo XXI ... este no es el fracaso del régimen alimentario moderno, sino la expresión lógica de sus paradojas centrales '. La situación es una en la que la malnutrición ya no se ve como una falla de un sistema que funciona de manera eficiente, sino como una característica endémica dentro de la producción sistémica de escasez (Nally 2011). Ante tales inconsistencias persistentes, los comentaristas señalan que los llamamientos neoliberales a la prosperidad humana, la seguridad alimentaria y el crecimiento verde parecen estar fuera de contacto y a menudo impulsados ideológicamente (Krueger y Gibbs 2007). El Antropoceno es un momento en que los desastres ecológicos, económicos y sociales van de la mano a medida que las economías e instituciones modernas se orientan hacia un crecimiento ilimitado que se desploma contra los sistemas biofísicos finitos de la tierra (Altvater et al.2016; Moore 2015). Cohen (2013) describe el Antropoceno como un desastre 'eco-eco', prestando atención a la relación podrida en la que la deuda económica se agrava con la deuda ecológica de la extinción de especies. Ahora más que nunca, la fe en los poderes modernizadores de las intervenciones alimentarias neoliberales que proclaman futuros justos y sostenibles se debilita (Stengers 2018), pero el parecido observado por algunos comentaristas (Gibson-Graham 2014), entre nuestro sistema alimentario y los sistemas financieros desquiciados de nuestras economías neoliberales trazan una tendencia alarmante. Vale la pena señalar que este parecido es más profundo que la mera producción de deuda (una es calórica y genética, la otra económica). La verdad es que nuestro sistema alimentario depende de un nexo de efectivo que vincula los aranceles comerciales, los subsidios agrícolas, la aplicación de los derechos de propiedad intelectual y la privatización de los sistemas de aprovisionamiento público. Visto desde arriba, estos procedimientos constituyen una gestión pseudo-corporativa del sistema alimentario, que según Nally (2011: 37) debe verse como un proceso propiamente biopolítico diseñado para gestionar la vida, "incluida la vida de los pobres que padecen hambre" dejar morir 'como intereses comerciales suplantar las necesidades humanas ". Los productos petroquímicos y micronutrientes, al parecer, no son las únicas cosas que se consumen en el Antropoceno; los futuros son (Collings 2014; Cardinale et al. 2012). Lo que alguna vez se consideraron los efectos secundarios necesarios del imperativo modernizador de la Revolución Verde, las llamadas "externalidades" de nuestro sistema alimentario actual, están cada vez más expuestos como una especie de "eficiencia engañosa" orientada hacia una producción y ganancias rápidas y muy poco más (Weis 2010). La perturbadora comprensión es que el sistema alimentario que heredamos de la Revolución Verde crea valor solo cuando se permite pasar por alto una gran cantidad de costos (físicos, biológicos, humanos, morales) (Tegtmeier

y Duffy 2004).

Un número cada vez mayor de voces nos recuerda que los costos de producción van más allá del medio ambiente en asuntos como la exclusión de los agricultores privados, la promoción de dietas destructivas (Pelletier y Tyedmers 2010) y, en general, la evacuación de la justicia social y la estabilidad política de los asuntos de provisión de alimentos (Power 1999). La relación entre la intervención tecnológica agraria, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad surge como un tema mucho más amplio y complejo de lo que podría ser reconocido por las narrativas de la Revolución Verde.

Situando el sistema alimentario contemporáneo dentro de los procesos históricos recientes dominantes, la discusión anterior ha prestado especial atención a los vínculos destructivos entre la agricultura moderna y las lógicas económicas del capitalismo tardío. Sin embargo, es importante recordar que numerosos comentaristas han advertido contra relatos excesivamente simplificados o deterministas con respecto a la relación entre las relaciones capitalistas de producción y la problemática del Antropoceno (Stengers 2015; Haraway 2015; Altvater et al.2016). Tal discusión es posible gracias a casi cuatro décadas de investigaciones críticas de feministas, académicas de ciencia y tecnología, historiadoras, geógrafos, antropólogos y activistas, que se han esforzado por rastrear los vínculos entre las formas hegemónicas de la ciencia y la destrucción social / ambiental causada por capitalismo industrial (Kloppenburg 1991). Esta ética de investigación "deconstructiva" desarrolló importantes entendimientos de la forma en que la agrisciencia moderna avanzó por trayectorias que implican el abandono de contextos e historias físicas, biológicas, políticas y sociales particulares (Kloppenburg 1991). En muchos casos, las narrativas modernizadoras del 'desarrollo' como las que se pusieron a trabajar en la Revolución Verde se vieron, por antropólogos, historiadores y comunidades indígenas por igual, como una especie de sucesor modificado del discurso colonial anterior a la guerra (Scott 2008; Martinez- Torres y Rosset 2010). En términos antropológicos, lo que estos estudios nos enseñaron fue que aunque la agricultura moderna se basaba en las narrativas de desarrollo de la prosperidad universal, en realidad, el "progreso" se logró mediante el desplazamiento o la destrucción de una gran diversidad de perspectivas, prácticas, ecologías y paisajes agrícolas. Es por esta razón que Cota (2011: 6) nos recuerda la importancia del trabajo crítico que posicionó explícitamente el paradigma biopolítico de la agricultura industrial "no primero y más importante como un tipo de imperialismo económico, sino más profundamente como un epistémico y culturalmente específico. Tipo de imperialismo". Este es un punto clave. La Revolución Verde no fue meramente técnica, ni intervención económica, pero implicó

la difusión de una reconfiguración más profunda de los registros epistemológicos de la provisión de alimentos en sí. Fue un proceso que influyó profundamente en la forma en que se producía, propagaba e implementaba el conocimiento agrícola. Como explica Cota (2011: 6): 'el uso del discurso fisicalista y probabilístico, una concepción puramente instrumental de la naturaleza y el trabajo, la implementación de cálculos estadísticos desconectados de las condiciones locales, [así como] la dependencia de modelos sin reconocer especificidades históricas 'fueron todas formas de promulgar la agenda biopolítica de la Revolución Verde. Esta lista de compromisos describe los fundamentos del final agudo de la Revolución Verde, pero como hemos visto, tales compromisos por sí solos han demostrado ser insuficientes para la tarea de crear un sistema alimentario justo y sostenible. Se hace evidente que cualquier agenda de investigación que se ajuste al Antropoceno debe aprender a ir más allá del paradigma alimentario moderno al forjar una ética de investigación diferente con compromisos diferentes.

16.4 CAMBIO DE PARADIGMA PARA UN NUEVO SISTEMA ALIMENTARIO

Afirmar que la agricultura está "en una encrucijada" (Kiers et al. 2008) no hace justicia a la magnitud de la situación. La enorme "brecha de sostenibilidad" (Fischer et al. 2007) en medio de llamados unánimes a la sostenibilidad se encuentra cada vez más con una respuesta común entre los investigadores: peticiones de medidas revolucionarias y cambios de paradigma. Foley y col. (2011: 5) lo expresó de manera bastante directa: 'Los desafíos que enfrenta la agricultura hoy en día son diferentes a todo lo que hemos experimentado antes, y requieren enfoques revolucionarios para resolver los problemas de producción de alimentos y sostenibilidad. En resumen, los nuevos sistemas agrícolas deben entregar más valor humano, a quienes más lo necesitan, con el menor daño ambiental". De alguna manera, el papel actual de la agricultura mundial como el principal impulsor del cambio ambiental global debe convertirse en un "agente crítico de una transición mundial" hacia la sostenibilidad global dentro del espacio operativo biofísico seguro de la Tierra (Rockström et al. 2017). El Antropoceno impone fuertes exigencias: la agricultura debe intensificarse; debe satisfacer las necesidades de una población en crecimiento, pero al mismo tiempo es obligatorio que las presiones ejercidas por nuestros sistemas de producción de alimentos se mantengan dentro de la capacidad de carga del planeta Tierra. Se entiende cada vez más que la seguridad alimentaria futura depende del desarrollo de tecnologías que aumenten la eficiencia del uso de los recursos y al mismo tiempo eviten la externalización de costos (Garnett et al. 2013). La búsqueda de alternativas a nuestro

paradigma agrícola actual ha puesto en primer plano ideas como la agroecología (Reynolds et al. 2014) y la 'intensificación sostenible', con el reconocimiento de que se debe avanzar realmente hacia la 'intensificación ecológica', es decir, aumentar producción agrícola al capitalizar los procesos ecológicos en los agroecosistemas (Struik y Kuyper 2014). Ha habido un debate bien documentado sobre lo que constituye la 'intensificación sostenible' (SI) de la agricultura, así como el papel que podría desempeñar para abordar la seguridad alimentaria global (Struik y Kuyper 2014; Kuyper y Struik 2014; Godfray y Garnett 2014). Los críticos han advertido contra los análisis globales de arriba hacia abajo que a menudo se enmarcan en perspectivas estrechas y orientadas a la producción, que exigen un compromiso más fuerte con la literatura más amplia sobre sostenibilidad, seguridad alimentaria y soberanía alimentaria (Loos et al.2014). Dichas lecturas revisan la necesidad de desarrollar enfoques de abajo hacia arriba basados en la región, con un consenso cada vez mayor que afirma que una agenda de la IS para el Antropoceno no implica una producción de alimentos 'comercial como de costumbre' con mejoras marginales en la sostenibilidad, sino más bien un replanteamiento radical - El uso de sistemas alimentarios no solo para reducir los impactos ambientales, sino también para mejorar el bienestar animal, la nutrición humana y apoyar las economías rurales / urbanas con un desarrollo sostenible (Godfray y Garnett 2014).

Mientras que la tradicional 'intensificación sostenible' (SI) ha sido criticada por algunos como demasiado centrada en la producción, o incluso como una contradicción en términos (Petersen y Snapp 2015), otros dejan en claro que el enfoque debe ser ampliamente concebido, con el reconocimiento de que no existe un único camino universal hacia la intensificación sostenible (Garnett y Godfray 2012). Aquí es importante la creciente apreciación de la "multifuncionalidad" en la agricultura (Potter 2004). Si, durante el siglo XX, el discurso demográfico "maltusiano" había asegurado el objetivo estrecho del desarrollo agrícola de aumentar la producción, el creciente redescubrimiento de las múltiples dimensiones de la agricultura que se está produciendo actualmente está alterando la percepción de la relación entre la agricultura y la sociedad. La 'multifuncionalidad' como idea se cuestionó inicialmente en el contexto de las controvertidas negociaciones de política agrícola y comercial del GATT y la OMC (Caron et al. 2008), pero desde entonces ha ganado una amplia aceptación, lo que lleva a una visión más integradora de nuestro sistema alimentario (Potter 2004). Desde este punto de vista, el progreso en ver a la agricultura como un tipo importante de "uso de la tierra" que compite con otras funciones de la tierra (Bringezu et al. 2014) se interrelaciona con una serie de otras perspectivas. Estos se han conceptualizado a través de varias categorías importantes:

1-.Como fuente de empleo y medios de vida para una población rural y futura urbana (McMichael 1994).
2-. Como parte clave del patrimonio cultural y la identidad (van der Ploeg y Ventura 2014).
3-.Como base de interacciones complejas de la cadena de valor en "sistemas alimentarios" (Perrot et al. 2011).
4-. Como sector en las economías regionales, nacionales y globales (Fuglie 2010);
5-. Como modificador y depósito de recursos genéticos (Jackson et al. 2010).
6-. Como una amenaza a la integridad ambiental que ejerce presiones destructivas sobre la biodiversidad (Brussaard et al. 2010; Smil 2011).
7-. Como fuente de emisiones de gases de efecto invernadero (Noordwijk 2014).

Esta lista no es exhaustiva, pero lo importante es que se entiende que cada una de estas dimensiones interactivas tiene un impacto en la sostenibilidad y la seguridad alimentaria de una forma u otra y debe ser aprehendida por intentos serios hacia la IS. Los resultados de sostenibilidad se ven cada vez más como una interacción compleja entre preocupaciones locales y globales (Reynolds et al. 2014). Las necesidades biofísicas, ecológicas y humanas se entremezclan dentro de las complejidades e idiosincrasias del "lugar" (Withers 2009). Las soluciones "únicas para todos", características de la Revolución Verde, no reconocen estos potenciales y demandas de sostenibilidad únicos. El resultado es que los cambios en la producción y el consumo de alimentos deben percibirse a través de una multiplicidad de escalas y estilos. Para este fin, Reynolds et al. (2014) sugieren un enfoque de sostenibilidad que aprovecha las ideas de los principios agroecológicos. Remiten un "enfoque de producción de alimentos" personalizado "adaptado explícitamente a la individualidad ambiental y cultural del lugar y respetuoso de los límites asimilativos de recursos y desechos locales, promoviendo así la diversidad biológica y cultural, así como la economía de estado estacionario". Si los temas en juego son inherentemente multidimensionales, otros también han subrayado que están en disputa. Las compensaciones entre la gran cantidad de preocupaciones biofísicas y humanas son inevitables y, a menudo, extremadamente complejas. Los umbrales de sostenibilidad son diversos, a menudo normativo, y rara vez se pueden realizar en su totalidad simultáneamente (Struik y Kuyper 2014). Se ha enfatizado que las nuevas direcciones hacia la sostenibilidad y la seguridad alimentaria requieren un cambio simultáneo a nivel de reglas sociales formales e informales y sistemas de incentivos (es decir, instituciones) que orienten la interacción y el comportamiento humano, y por lo tanto, se considera que la 'innovación institucional' punto de entrada clave para abordar los desafíos (Hall et al. 2001). En la medida en que la complejidad de la intensificación sostenible se deriva de los encuadres humanos (que implican y fluyen de contextos, identidades, intenciones, prioridades

e incluso contradicciones), están, como Kuyper y Struik (2014: 72) lo ponen, 'más allá del dominio de la ciencia'. Intentar conciliar las muchas dimensiones de la producción de alimentos con fines sostenibles y dentro de los límites de nuestro planeta finito implica una gran incertidumbre, irreductibilidad y contestación (Funtowicz y Ravetz 1995); requiere una conciencia y un reconocimiento de que tales problemas tienen consecuencias políticas. Los sistemas alimentarios y la investigación de la sostenibilidad han recorrido un largo camino para expandir el enfoque estrecho de la Revolución Verde, aportando una mayor claridad a los empinados desafíos que enfrentamos en la búsqueda de un sistema alimentario más ambiental y socialmente sostenible. Gracias a una amplia gama de trabajos, ahora es evidente que la producción de alimentos se encuentra en el centro de un nexo de procesos interconectados y multiescalares, en los que se basa la humanidad para satisfacer una gran cantidad de necesidades multidimensionales (a menudo contradictorias) (físicas, biológicas, económicas, culturales). Como Rockström et al. (2017: 7) han declarado:

'La agricultura mundial ahora debe cumplir con las necesidades sociales y cumplir con los criterios de sostenibilidad que permitan que los alimentos y todos los demás servicios del ecosistema agrícola (es decir, estabilización climática, control de inundaciones, apoyo a la salud mental, nutrición, etc.) generado dentro de un espacio operativo seguro de un sistema terrestre estable y resistente ". Es precisamente dentro de estos objetivos agrícolas recalibrados que se debe desarrollar la tecnología de acuaponia.

16.5 ¿POTENCIAL ACUAPÓNICO O ESPERANZA FUERA DE LUGAR?

La investigación contemporánea en acuaponia ha demostrado una gran conciencia de las preocupaciones particulares planteadas en la problemática del Antropoceno. Las justificaciones para la investigación en acuaponia han tendido a poner en primer plano el desafío de la seguridad alimentaria en un mundo con una población humana en aumento y una base de recursos cada vez más tensa. Por ejemplo, König et al. (2016) sitúan con precisión la acuaponía dentro de las preocupaciones planetarias del discurso del Antropoceno cuando afirman:

'Garantizar la seguridad alimentaria en el siglo XXI dentro de límites planetarios sostenibles requiere una intensificación agroecológica multifacética de la producción de alimentos y el desacoplamiento del uso insostenible de recursos '. Hacia estos importantes objetivos de sostenibilidad, se afirma que la tecnología acuaponia es muy prometedora (Goddek et al. 2015). Los innovadores sistemas cerrados de acuaponia

ofrecen una convergencia especialmente atractiva de posibles resoluciones que podrían contribuir a un futuro más sostenible.

Los defensores de la acuaponia a menudo enfatizan los principios ecológicos en el corazón de esta tecnología emergente. Los sistemas acuaponicos aprovechan el potencial positivo de un ecosistema más o menos simple, a fin de reducir el uso de insumos finos y al mismo tiempo reducir los subproductos de desecho y otras externalidades. Por estos motivos, la tecnología acuaponica puede verse como un ejemplo principal de 'intensificación sostenible' (Garnett et al. 2013) o, más precisamente, como una forma de 'intensificación ecológica' ya que sus principios fundacionales se basan en la gestión de organismos proveedores de servicios para contribuciones cuantificables y directas a la producción agrícola (Bommarco et al. 2013). De este principio agroecológico fluyen una gran cantidad de beneficios potenciales de sostenibilidad. Los capítulos 1 y 2 de este libro hacen un trabajo ejemplar al destacarlos, detallando los desafíos que enfrenta nuestro sistema alimentario y situando la ciencia de acuaponia como el lugar potencial para una gama de intervenciones de sostenibilidad y seguridad alimentaria. No es necesario repetir estos puntos nuevamente, pero vale la pena señalar que esta convergencia percibida de posibles resoluciones es lo que impulsa la investigación y fortalece la ``convicción de que esta tecnología tiene el potencial de desempeñar un papel importante en la producción de alimentos en el futuro '' (7).) (Junge y col. 2017). Sin embargo, a pesar de las considerables afirmaciones hechas por sus defensores, el futuro de la acuaponia es menos que seguro. El tipo de papel que la acuaponía podría desempeñar en las transiciones a la provisión sostenible de alimentos aún está en debate: de manera crucial, debemos enfatizar, la publicación de los resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria de los sistemas acuaponicos sigue siendo notable por su ausencia en Europa (König et al. 2018) En el papel, los atributos "carismáticos" de la acuaponía aseguran que pueda presentarse fácilmente como un tipo de innovación de "bala de plata" que llega al corazón de los problemas más profundos de sostenibilidad y seguridad alimentaria de nuestro sistema alimentario (Brooks et al. 2009). Dichas imágenes han sido capaces de atraer considerable atención para la acuaponia mucho más allá de los confines de la investigación académica; considere, por ejemplo, la producción significativa de "bombo" acuaponico en línea en comparación con campos similares, señalados por Junge et al. (2017) Es aquí donde podemos tomar tiempo para señalar la relación entre el potencial percibido de la acuaponia y el "tecno-optimismo". La introducción de cada nueva tecnología va acompañada de mitos que suscitan un mayor interés en esa tecnología (Schoenbach 2001). Los mitos circulan entre los primeros usuarios y los medios de comunicación los recogen a menudo mucho antes

de que la comunidad científica tenga tiempo para analizar y responder a sus afirmaciones. Los mitos, como dice Schoenbach (2001, 362), son ampliamente creídos porque "comprenden una explicación clara y convincente del mundo". Estas poderosas explicaciones pueden dinamizar y alinear la acción individual, comunitaria y también institucional hacia fines particulares.

La "belleza" de la acuaponia, si podemos llamarlo así, es que el concepto a menudo puede reducir la complejidad de los problemas de sostenibilidad y seguridad alimentaria en metáforas de sistemas claros, comprensibles y escalables. La imagen ubicua del ciclo acuaponico-flujo de agua entre peces, plantas y bacterias-que resuelve elegantemente los desafíos del sistema alimentario es ejemplar aquí. Sin embargo, los mitos sobre la tecnología, ya sean optimistas o pesimistas, comparten una visión tecno-determinista de la relación entre tecnología y sociedad (Schoenbach 2001). Dentro de la visión tecno-determinista de la tecnología, es la tecnología la que causa cambios importantes en la sociedad: si logramos cambiar la tecnología, así logramos cambiar el mundo. Independientemente de si el cambio es para mejor (tecno-optimismo) o peor (tecnofobia), la tecnología por sí misma crea un efecto. Los puntos de vista tecno-deterministas han sido criticados a fondo por la filosofía sociológica osófico (Bradley 2011), marxista (Hornborg 2013), material semiótico (Latour 1996) y motivos feministas (Haraway 1997). Estos enfoques más matizados del desarrollo tecnológico afirmarían que la tecnología por sí sola no trae cambios a la sociedad; no es inherentemente bueno ni malo, sino que siempre está incrustado en las estructuras de la sociedad, y son esas estructuras las que permiten el uso y el efecto de la tecnología en cuestión. En un grado u otro, la tecnología es una entidad emergente, cuyos efectos no podemos conocer de antemano (de Laet y Mol 2000). Esto puede parecer un punto obvio, pero el tecno determinismo sigue siendo una característica fuerte, aunque a menudo latente, dentro de nuestro paisaje epistemológico contemporáneo. Nuestras sociedades tecnológicas impulsadas por la innovación se mantienen mediante regímenes discursivos que se aferran a la promesa de renovación social a través del avance tecnológico (Lave et al. 2010). Se ha demostrado que tales creencias tienen un papel normativo importante dentro de las comunidades de expertos, ya sean científicos, empresarios o formuladores de políticas (Franklin 1995; Soini y Birkeland 2014).

El auge de la acuaponia en Europa se entrelaza con intereses específicos de varios actores. Podemos identificar al menos cinco procesos sociales que condujeron al desarrollo de acuaponia:

A-. Interés de las autoridades públicas en financiar soluciones de alta tecnología

para problemas de sostenibilidad.

B-. Financiamiento de capital de riesgo, motivado por los éxitos en las nuevas empresas de TI, en busca de "la próxima gran cosa" que quizás descubra el nuevo "unicornio" (empresas de nueva creación valoradas en más de $ USD mil millones).

C-. Interés centrado en eventos de los medios de comunicación en informes instantáneos sobre historias positivas de nuevas empresas de acuaponia, impulsadas por las actividades de relaciones públicas de estas nuevas empresas, con informes de seguimiento de los medios raros sobre las empresas que se declararon en quiebra.

D-. El crecimiento apoyado por Internet de comunidades entusiastas de acuaponía de bricolaje, compartiendo valores de sostenibilidad y amor por jugar con nuevas tecnologías.

E-.Intereses de los desarrolladores urbanos para encontrar soluciones económicamente viables para espacios urbanos vacíos y la ecologización del espacio urbano.

F-. Comunidades de investigación enfocadas en desarrollar soluciones tecnológicas para problemas inminentes de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

En mayor o menor grado, el espectro de la esperanza tecno-optimista impregna el desarrollo de la acuaponia. Aunque las afirmaciones de posiciones tecno-optimistas son inspiradoras y capaces de precipitar la inversión de dinero, tiempo y recursos de diversos actores, el potencial de tales puntos de vista para generar justicia y sostenibilidad ha sido cuestionado en escalas de temas locales (Leonard 2013) y regionales. (Hultman 2013) a los imperativos mundiales (Hamilton 2013). Y es en este punto, podríamos considerar las ambiciones de nuestro propio campo. Un buen punto de partida sería el 'COST action FA1305', que ha sido un facilitador importante de la producción de investigación acuaponia de Europa en los últimos años, con varias publicaciones que reconocen el impacto positivo de la acción en la investigación habilitadora (Miličić et al.2017; Delaide et al.2017; Villarroel et al.2016). Al igual que todas las acciones de COST, este instrumento de red transnacional financiado por la UE ha actuado como un centro para la investigación acuaponia en Europa, galvanizando y ampliando las redes tradicionales entre los investigadores al reunir a expertos de la ciencia, instalaciones experimentales y empresarios. La declaración de misión original de la acción COST FA1305 dice lo siguiente:

La acuaponía tiene un papel clave que desempeñar en el suministro de alimentos y abordar los desafíos mundiales como la escasez de agua, la seguridad alimentaria, la urbanización y las reducciones en el uso de energía y las millas de alimentos. La UE reconoce estos desafíos a través de su Política Agrícola Común y las políticas de Protección del Agua, Cambio

Climático e Integración Social. Se requiere un enfoque europeo en el campo de investigación de acuaponía emergente a nivel mundial que se basa en el estado de Europa como centro global de excelencia e innovación tecnológica en los ámbitos de la acuicultura y la horticultura hidropónica. El Centro de Acuaponía de la UE tiene como objetivo el desarrollo de la acuaponía en la UE, liderando la agenda de investigación a través de la creación de un centro de redes de investigación experta y científicos de la industria, ingenieros, economistas, acuicultores y horticultores, y contribuyendo a la capacitación de jóvenes científicos acuaponicos. El Centro de Acuaponía de la UE se centra en tres sistemas primarios en tres entornos:

1-. "ciudades y áreas urbanas" - acuaponia de agricultura urbana.
2-."sistemas de países en desarrollo" - diseño de sistemas y tecnologías para la seguridad alimentaria para la población local.
3-. "acuaponia a escala industrial" - proporcionando sistemas competitivos que brinden un costo efectivo alimentos locales sanos y sostenibles en la UE. (http://www.cost.eu/COST_Actions/fa/FA1305, 12.10.2017, énfasis agregado).

Como sugiere la declaración de la misión, desde el comienzo de la acción COST FA1305, se colocaron altos niveles de optimismo en el papel de la acuaponía en la lucha contra la sostenibilidad y los desafíos de seguridad alimentaria. La creación del COST EU Aquaponics Hub fue para 'Proporcionar un foro necesario para" poner en marcha "la acuaponía como una industria seria y potencialmente viable para la producción sostenible de alimentos en la UE y el mundo" (COST 2013). De hecho, a partir de la propia participación de los autores en COST FA1305, nuestra experiencia duradera fue sin duda una de ser parte de una comunidad de investigación vibrante, entusiasmada y altamente calificada que estaba más o menos unida en su ambición de hacer que la acuaponía funcione hacia un futuro más sostenible. Cuatro años después de la emisión de la declaración de misión del Aquaponic Hub, sin embargo, el potencial de sostenibilidad y seguridad alimentaria de la acuaponía sigue siendo solo eso: potencial. En la actualidad, no está claro qué papel preciso puede desempeñar la acuaponía en el futuro sistema alimentario de Europa (König et al. 2018).16 La narrativa comúnmente observada de que la acuaponia proporciona una solución sostenible a los desafíos globales que enfrenta la agricultura revela una idea errónea fundamental de lo que realmente es capaz de lograr. El lado vegetal de la acuaponia es la horticultura, no la agricultura, que produce verduras de hoja verde con alto contenido de agua y bajo valor nutricional en comparación con los alimentos básicos que produce la agricultura en las tierras de cultivo. Una comparación rápida del área agrícola actual, el área hortícola y el área hortícola

protegida, 184.332 km2, 2.290 km2 (1,3%) y 9,84 km2 (0,0053%), en Alemania, revela el defecto en la narrativa. Incluso si se considera una productividad mucho mayor en acuaponia mediante la utilización de sistemas de ambiente controlado, la acuaponía ni siquiera está cerca de tener el potencial de tener un impacto real en la práctica agrícola. Esto se vuelve aún más obvio cuando la ambición de ser un "sistema alimentario del futuro" termina en la búsqueda de cultivos de alto valor (por ejemplo, microgreens) que pueden comercializarse como gastronomía gourmet. Es bien sabido que el desarrollo de tecnología sostenible se caracteriza por incertidumbres, altos riesgos y grandes inversiones con retornos tardíos (Alkemade y Suurs 2012). La acuaponia, a este respecto, no es una excepción; solo existen unos pocos sistemas operativos comercialmente en toda Europa (Villarroel et al.2016). Aparece una resistencia considerable al desarrollo de la tecnología acuaponica. Los proyectos comerciales tienen que lidiar con una complejidad tecnológica y de gestión comparativamente alta, significa riesgos de comercialización, así como una situación regulatoria incierta que hasta ahora persiste (Joly et al. 2015). Aunque es difícil precisar la tasa de fracaso de inicio, la breve historia de la acuaponía comercial en Europa bien podría resumirse como "pequeños éxitos y grandes fracasos" (Haenen 2017). Vale la pena señalar también que los pioneros que ya están involucrados en acuaponia en Europa en este momento no tienen claro si su tecnología está logrando mejoras en la sostenibilidad (Villarroel et al.2016). Análisis recientes de König et al. (2018) ha mostrado cómo los desafíos para el desarrollo de acuaponia se derivan de una serie de preocupaciones estructurales, así como de la complejidad inherente de la tecnología. Combinados, estos factores dan como resultado un entorno de alto riesgo para empresarios e inversores, lo que ha producido una situación en la que las instalaciones de inicio en Europa se ven obligadas a centrarse en la producción, el marketing y la formación del mercado en lugar de la entrega de credenciales de sostenibilidad (König et al.2018). Además de las afirmaciones de gran potencial, la sombría realidad es que aún queda por ver qué impacto puede tener la acuaponía en los regímenes de producción y consumo de alimentos entrelazados que operan en los tiempos contemporáneos. Parece que el lugar para la tecnología acuaponica en la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles no tiene garantía. Más allá de la especulación del tecno-optimismo, la acuaponia se ha convertido en una tecnología de producción de alimentos altamente compleja que tiene potencial pero se enfrenta a grandes desafíos.

En general, existe una falta de conocimiento sobre cómo dirigir las actividades de investigación para desarrollar tales tecnologías de una manera que mantenga su promesa de sostenibilidad y posibles soluciones a las preocupaciones urgentes del sistema alimentario (Elzen et al. 2017) Una

encuesta reciente realizada por Villarroel et al. (2016) descubrieron que de los 68 actores acuaponicos que respondieron, extendidos por 21 países europeos, el 75% estuvo involucrado en actividades de investigación y el 30.8% en la producción, y solo el 11.8% de los encuestados vendió pescado o plantas en los últimos 12 meses. Está claro que el campo de la acuaponia en Europa todavía está conformado principalmente por actores de la investigación. En este entorno de desarrollo, creemos que la próxima fase de la investigación en acuaponia será crucial para desarrollar el futuro potencial de sostenibilidad y seguridad alimentaria de esta tecnología. Las entrevistas (König et al.2018) y las encuestas cuantitativas (Villarroel et al.2016) del campo acuático europeo han indicado que hay opiniones encontradas sobre la visión, las motivaciones y las expectativas sobre el futuro de la acuaponia. A la luz de esto, Konig et al. (2018) han expresado su preocupación de que una diversidad de visiones para la tecnología acuaponica podría dificultar la coordinación entre los actores y, en última instancia, interrumpir el desarrollo de "un corredor realista de caminos de desarrollo aceptables" para la tecnología (König et al. 2018). Desde la perspectiva de los sistemas de innovación, las innovaciones emergentes que muestran una diversidad desorganizada de visiones pueden sufrir un "fallo de direccionalidad" (Weber y Rohracher 2012) y finalmente no alcanzar sus potenciales percibidos Dichas perspectivas coinciden con las posiciones de la ciencia de la sostenibilidad que enfatizan la importancia de las "visiones" para crear y perseguir futuros deseables (Brewer 2007). A la luz de esto, ofrecemos una visión de este tipo para el campo de la acuaponia. Argumentamos que la investigación en acuaponia debe volver a centrarse en una agenda radical de sostenibilidad y seguridad alimentaria que se ajuste a los desafíos inminentes que enfrenta el Antropoceno.

16.6 HACIA UN PARADIGMA DE: "SOSTENIBILIDAD PRIMERO"

Como vimos anteriormente, se ha enfatizado que el objetivo de avanzar hacia una intensificación sostenible surge del reconocimiento de los límites del paradigma convencional de desarrollo agrícola y sus sistemas de innovación. Reconociendo la necesidad de innovaciones en el sistema alimentario que excedan el paradigma tradicional y que puedan explicar la complejidad que surge de los problemas de sostenibilidad y seguridad alimentaria, Fischer et al. (2007) han pedido nada menos que "un nuevo modelo de sostenibilidad" por completo. Del mismo modo, en su reciente petición de esfuerzos globales hacia una intensificación sostenible, Rockström et al. (2017) han señalado que un cambio de paradigma en nuestro sistema alimentario implica desafiar los patrones dominantes de investigación y desarrollo que mantienen el enfoque de "primera productividad" al tiempo que subordinan las agendas de sostenibilidad a

un papel secundario de "mitigación". En cambio, piden una inversión de este paradigma para que los "principios sostenibles se conviertan en el punto de entrada para generar mejoras de productividad". Después de esto, sugerimos una primera visión de sostenibilidad para acuaponia como una posible orientación que puede ofrecer coherencia al campo y guiar su desarrollo hacia los objetivos proclamados de sostenibilidad y seguridad alimentaria.

Como con la mayoría de los llamados a la sostenibilidad, nuestra primera propuesta de sostenibilidad puede sonar bastante obvia e inmutable a primera vista, si no completamente redundante; seguramente, podríamos decir que la acuaponía tiene que ver con la sostenibilidad. Pero la historia nos recordaría que hacer reclamos de sostenibilidad es una tarea agradable, mientras que asegurar los resultados de sostenibilidad es mucho menos seguro (Keil 2007). Como hemos argumentado, la "sostenibilidad" de la acuaponía existe actualmente como potencial. La forma en que este potencial se traduzca en resultados de sostenibilidad debe ser una preocupación para nuestra comunidad de investigación. Nuestra propuesta de "sostenibilidad primero" está lejos de ser sencilla. En primer lugar, esta propuesta exige que, si nuestro campo es justificarse por razones de sostenibilidad, debemos familiarizarnos con la naturaleza de la sostenibilidad misma. En este sentido, creemos que hay mucho que aprender del creciente ámbito de la ciencia de la sostenibilidad, así como de los Estudios de Ciencia,Tecnología y Sociedad (STS). Descubriremos que mantener un enfoque de sostenibilidad dentro de la investigación acuaponica representa un cambio potencialmente enorme en la dirección, composición y ambición de nuestra comunidad de investigación. Dicha tarea es necesaria si queremos dirigir el campo hacia objetivos coherentes y realistas que permanezcan enfocados en los resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria que sean relevantes para el Antropoceno. Tomar en serio la sostenibilidad es un desafío enorme. Esto se debe a que, en esencia, la sostenibilidad es fundamentalmente un concepto ético que plantea preguntas sobre el valor de la naturaleza, la justicia social, las responsabilidades para las generaciones futuras, etc. y abarca el carácter multidimensional de los problemas del medio ambiente humano (Norton 2005). Como discutimos anteriormente, los umbrales de sostenibilidad que pueden establecerse con respecto a las prácticas agrícolas son diversos y, a menudo, no pueden conciliarse en su totalidad, lo que obliga a la necesidad de "compensaciones" (Funtowicz y Ravetz 1995). Las elecciones deben hacerse frente a estas compensaciones y, con mayor frecuencia, los criterios en los que se basan dichas elecciones dependen no solo de preocupaciones científicas, técnicas o prácticas, sino también de normas y valores morales. No hace falta decir que hay poco consenso sobre cómo

tomar estas decisiones ni hay un mayor consenso sobre las normas y los valores morales. en si mismos. Independientemente de este hecho, las investigaciones sobre los valores están en gran parte ausentes en la agenda general de ciencias de la sostenibilidad, sin embargo, como Miller et al. (2014) afirman, "a menos que los valores [de la sostenibilidad] se entiendan y articulen, las dimensiones políticas inevitables de la sostenibilidad permanecerán ocultas detrás de las afirmaciones científicas". Tales situaciones impiden la unión y la deliberación democrática entre las comunidades, una tarea determinada para lograr caminos más sostenibles.Tomar nota del lugar destacado de los valores en la acción colectiva hacia sostenibilidad y seguridad alimentaria, los estudiosos del campo de la ciencia y tecnología han resaltado que, en lugar de ser tratados como una externalidad importante para los procesos de investigación (a menudo tratados por separado o después del hecho), los valores deben trasladarse hacia arriba en las agendas de investigación (Jasanoff 2007) cuando los valores se convierten en una parte central de la investigación de sostenibilidad, llega el reconocimiento de que las decisiones ya no pueden basarse únicamente en criterios técnicos. Esto tiene un impacto potencialmente enorme en el proceso de investigación, porque tradicionalmente lo que podría haberse considerado con el único mandato del "conocimiento experto" ahora debe abrirse a otras corrientes de conocimiento (por ejemplo, conocimiento "laico", indígena y profesional) con todo lo epistemológico y la dificultad que esto conlleva (Lawrence 2015).

En respuesta a estos problemas, la ciencia de la sostenibilidad ha surgido como un campo que tiene como objetivo trascender los límites disciplinarios y busca involucrar a los no científicos en procesos de investigación orientados a soluciones y determinados por el contexto que se centran en la generación de resultados (Miller et al. 2014). Una pregunta clave en estas discusiones es el conocimiento. Los problemas de sostenibilidad a menudo son causados por la compleja interacción de diversos factores socioecológicos, y el conocimiento necesario para gobernar eficazmente estos desafíos se ha vuelto progresivamente más disperso y especializado (Ansell y Gash 2008). El conocimiento requerido para comprender cómo las preocupaciones de sostenibilidad se unen es demasiado complejo para ser organizado por un solo cuerpo y da como resultado la necesidad de integrar diferentes tipos de conocimiento de nuevas maneras. Este es ciertamente el caso de nuestro propio campo: al igual que otros modos de intensificación sostenible (Caron et al. 2014), los sistemas acuaponicos se caracterizan por una complejidad inherente (Junge et al. 2017) que pone gran énfasis en nuevas formas de producción de conocimiento. (FAO 2013). La complejidad de los sistemas acuaponicos

se deriva no solo de su carácter "integrado", sino que también se deriva de las estructuras económicas, institucionales y políticas más amplias que impactan en la entrega de acuaponia y su potencial de sostenibilidad (König et al. 2016). El desarrollo de soluciones hacia sistemas alimentarios hidropónicos sostenibles puede implicar enfrentarse con diversos ámbitos de comprensión, desde la ingeniería, la horticultura, la acuicultura, la microbiología, la investigación ecológica, económica y de salud pública, hasta las inquietudes de conocimiento práctico y experimental de profesionales, minoristas y consumidores. Lo que esto significa no es solo una agrupación de ideas y posiciones, sino que implica desarrollar modos de producción de conocimiento completamente novedosos y una apreciación para cerrar las 'brechas de conocimiento' (Caron et al. 2014). Abson y col. (2017) han identificado tres requisitos clave de nuevas formas de producción de conocimiento que pueden fomentar transformaciones de sostenibilidad:

1-. La inclusión explícita de valores, normas y características de contexto en el proceso de investigación para producir conocimiento "Socialmente robusto".
2-. Procesos de aprendizaje mutuo entre ciencia y sociedad, que implican un replanteamiento del papel de la ciencia en la sociedad.
3-. Una agenda de investigación orientada a problemas y soluciones.

Recurrir a estas tres ideas puede ayudar a nuestro campo a desarrollar lo que llamamos un "conocimiento crítico de sostenibilidad" para acuaponia. A continuación, discutimos tres áreas que nuestra comunidad de investigación puede abordar que consideramos cruciales para desbloquear el potencial de sostenibilidad de la acuaponía: parcialidad, contexto y preocupación. El desarrollo de una comprensión de cada uno de estos puntos ayudará a nuestro campo a buscar un enfoque orientado a la solución para la sostenibilidad acuaponica y los resultados de seguridad alimentaria.

16.7 "CONOCIMIENTO CRÍTICO DE SOSTENIBILIDAD" PARA ACUAPONIA

16.7.1 Parcialidad

A pesar de los relatos contemporáneos de sostenibilidad que subrayan su carácter complejo, multidimensional y controvertido, en la práctica, gran parte de la ciencia que se ocupa de cuestiones de sostenibilidad sigue fijada a la disciplina tradicional y disciplinaria. perspectivas y acciones (Miller et al. 2014). Hay que decir que el conocimiento disciplinario tiene un valor obvio y ha brindado enormes avances en la comprensión desde la antigüedad. Sin embargo, la apreciación y aplicación de los problemas de

sostenibilidad a través de los canales disciplinarios tradicionales se ha caracterizado por el fracaso histórico para facilitar el cambio social más profundo necesario para problemas como el que enfrentamos aquí: la transformación sostenible del paradigma del sistema alimentario (Fischer et al. 2007). La articulación de los problemas de sostenibilidad a través de los canales disciplinarios tradicionales a menudo conduce a conceptualizaciones "atomizadas" que ven las dimensiones biofísicas, sociales y económicas de la sostenibilidad como entidades compartimentadas y asumen que pueden abordarse de forma aislada (por ejemplo, Loos et al. 2014). En lugar de ver los problemas de sostenibilidad como una convergencia de componentes interactivos que deben abordarse juntos, las perspectivas disciplinarias a menudo promueven "tecnófitos" para abordar lo que a menudo son problemas multidimensionales complejos (por ejemplo, Campeanu y Fazey 2014). Una característica común de tales marcos es que a menudo implican que los problemas de sostenibilidad pueden resolverse sin tener en cuenta las estructuras, objetivos y valores que sustentan problemas complejos a niveles más profundos, por lo general, prestando poca atención a las ambigüedades de la acción humana, la dinámica institucional y concepciones más matizadas del poder. La práctica de dividir un problema en componentes discretos, analizando estos de forma aislada y luego reconstruir un sistema a partir de interpretaciones de las partes ha sido una visión metodológica enormemente poderosa que rastrea su historia hasta los albores de la modernidad con la llegada del reduccionismo cartesiano (Merchant 1981). Al ser un principio clave de la producción de conocimiento objetivo, esta práctica constituye la base de la mayoría del esfuerzo disciplinario en las ciencias naturales. La importancia del conocimiento objetivo, por supuesto, radica en que proporciona a la comunidad investigadora 'hechos'; percepciones precisas y reproducibles sobre fenómenos generalmente dispersos. La producción de hechos fue la sala de máquinas de la innovación que impulsó la Revolución Verde. La ciencia alimentó el "conocimiento experto" y proporcionó información penetrante sobre la dinámica en nuestros sistemas de producción de alimentos que permaneció invariable a través del cambio en el tiempo, el espacio o la ubicación social. Construir un catálogo de este tipo de conocimiento y desplegarlo como lo que Latour (1986) llama "móviles inmutables" formó la base de los sistemas universales de monocultivo, fertilización y control de plagas que caracterizan el sistema alimentario moderno (Latour 1986). Pero esta forma de producción de conocimiento tiene debilidades. Como cualquier científico sabe, para obtener conocimientos significativos, este método debe aplicarse estrictamente.

Se ha demostrado que esta producción de conocimiento está "sesgada

hacia aquellos elementos de la naturaleza que ceden a su método y hacia la selección de los problemas más manejables para las soluciones con el conocimiento producido de ese modo" (Kloppenburg 1991). Un claro ejemplo de esto sería nuestra agenda de investigación de seguridad alimentaria desequilibrada que privilegia en gran medida la producción por sobre temas de conservación, sostenibilidad o soberanía alimentaria (Hunter et al.2017). La mayor parte del trabajo de alto perfil en seguridad alimentaria se concentra en la producción (Foley et al. 2011), enfatizando los flujos materiales y los presupuestos sobre cuestiones más profundas como las estructuras, reglas y valores que dan forma a los sistemas alimentarios. El simple hecho es que, dado que sabemos más sobre intervenciones materiales, es más fácil diseñar, modelar y experimentar sobre estos aspectos del sistema alimentario. Como Abson et al. (2017:2) señalan: "Muchas aplicaciones científicas de sustentabilidad de líderes suponen que algunos de los impulsores más desafiantes de la insostenibilidad se pueden ver como" propiedades del sistema fijo "que se pueden abordar de forma aislada". Al seguir los caminos en los que el éxito experimental se realiza con mayor frecuencia, los enfoques disciplinarios "atomizados" descuidan aquellas áreas donde otros enfoques pueden resultar gratificantes. Dichos "puntos ciegos" epistemológicos significan que las intervenciones de sostenibilidad a menudo se orientan hacia aspectos altamente tangibles que pueden ser fáciles de prever e implementar, pero que tienen un potencial débil para "apalancar" la transición sostenible o un cambio más profundo del sistema (Abson et al. 2017). Conocer los límites y parcialidades de nuestro conocimiento disciplinario es un aspecto que destacamos cuando afirmamos la necesidad de desarrollar un "conocimiento crítico de sostenibilidad" para acuaponia. Visto desde perspectivas disciplinarias, las credenciales de sostenibilidad de los sistemas acuaponicos pueden ser más o menos fáciles de definir (por ejemplo, consumo de agua, eficiencia del reciclaje de nutrientes, rendimientos comparativos, consumo de insumos no renovables, etc.). De hecho, cuanto más estrictamente definimos los criterios de sostenibilidad, más sencillo es probar tales parámetros y más fácil es sellar el reclamo de sostenibilidad en nuestros sistemas. El problema es que podemos diseñar nuestro camino hacia una forma de sostenibilidad que solo unos pocos podrían considerar sostenible. Parafraseando a Kläy et al. (2015), cuando transformamos nuestra preocupación original de cómo realizar un sistema alimentario sostenible en una 'cuestión de hechos' (Latour 2004) y limitamos nuestro esfuerzo de investigación al análisis de estos hechos, cambiamos sutil pero profundamente el problema y la dirección de investigación. Churchman (1979: 4–5) identificó este problema y descubrió que debido a que la ciencia aborda principalmente la identificación y la solución de problemas, y no los aspectos éticos sistémicos y relacionados,

siempre existe el riesgo de que las soluciones ofrecidas puedan incluso aumentar la insostenibilidad del desarrollo, lo que él llamó la "falacia ambiental" (Churchman 1979). Podríamos plantear preocupaciones relacionadas con nuestro propio campo. Las primeras investigaciones en acuaponia intentaron responder preguntas relacionadas con el potencial ambiental de la tecnología, por ejemplo, con respecto a la descarga de agua, los insumos de recursos y el reciclaje de nutrientes, con investigaciones diseñadas en torno a sistemas acuaponicos a pequeña escala. Aunque es cierto que su enfoque es limitado, esta investigación generalmente tuvo en cuenta las preocupaciones de sostenibilidad.

Recientemente, sin embargo, hemos detectado un cambio en el enfoque de la investigación. Esto se plantea en el cap. 1 de este libro, cuyos autores comparten nuestra propia opinión, observando que la investigación "en los últimos años se ha desplazado cada vez más hacia la viabilidad económica para hacer que la acuaponía sea más productiva para aplicaciones agrícolas a gran escala". Hemos encontrado que las discusiones están cada vez más preocupadas por las vías de eficiencia y rentabilidad que a menudo fijan el potencial de la acuaponia frente a su competencia percibida con otros métodos de producción a gran escala (hidroponía y RAS). El argumento parece ser que solo cuando se resuelven los problemas de productividad del sistema, a través de medidas de eficiencia y soluciones técnicas como la optimización de las condiciones de crecimiento de las plantas y los peces, la acuaponia se vuelve económicamente competitiva con otras tecnologías de producción de alimentos industriales y se legitima como un método de producción de alimentos. Ciertamente estaríamos de acuerdo en que la viabilidad económica es un componente importante de el potencial de resistencia y sostenibilidad a largo plazo de la acuaponia. Sin embargo, advertiría en contra de definir demasiado estrictamente nuestra ética de investigación, y de hecho, la visión futura de la acuaponía, basada en principios de producción y ganancias solamente. Nos preocupa que cuando la investigación en acuaponia se limite a la eficiencia, la productividad y la competitividad del mercado, se repitan las viejas lógicas de la Revolución Verde y nuestras demandas de seguridad alimentaria y sostenibilidad se vuelvan superficiales. Como vimos anteriormente, el produccionismo ha sido entendido como un proceso en el cual una lógica de producción determina en exceso otras actividades de valor dentro de los sistemas agrícolas (Lilley y Papadopoulos 2014). Dado que la sostenibilidad implica inherentemente una compleja diversidad de valores, tememos que estas estrechas vías de investigación arriesguen la articulación de la acuaponía dentro de una visión restringida de la sostenibilidad. Hacer la pregunta "¿en qué circunstancias puede la acuaponia superar a los métodos tradicionales de producción de alimentos a gran escala?" No es lo

mismo que preguntar "¿en qué medida puede la acuaponía satisfacer las demandas de sostenibilidad y seguridad alimentaria del Antropoceno?".

16.7.2 Contexto

La producción de conocimiento a través de vías disciplinarias tradicionales implica una pérdida de contexto que puede reducir nuestra respuesta a problemas complejos de sostenibilidad. La naturaleza multidimensional de la seguridad alimentaria implica que "no existe un camino único globalmente válido para la intensificación sostenible" (Struik y Kuyper 2014). Las demandas físicas, ecológicas y humanas impuestas a nuestros sistemas alimentarios dependen del contexto y, como tales, también lo son las presiones de sostenibilidad y seguridad alimentaria que fluyen de estas necesidades. La intensificación requiere contextualización (Tittonell y Giller2013). La sostenibilidad y la seguridad alimentaria son resultados de prácticas "situadas", y no pueden extraerse de las idiosincrasias de contexto y "lugar" que se ven cada vez más como factores importantes en los resultados de tales (Altieri 1998; Hinrichs 2003; Reynolds et al. 2014). Sumado a esto, el Antropoceno plantea una tarea adicional: las formas localizadas de conocimiento deben combinarse con el conocimiento "global" para producir soluciones sostenibles.

La problemática del Antropoceno nos impone una fuerte necesidad de reconocer la interconexión del sistema alimentario mundial y nuestro lugar globalizado dentro de él: la forma particular en que se logra la intensificación sostenible en una parte del planeta es probable que tenga ramificaciones en otros lugares (Garnett et al. 2013) Desarrollar un "conocimiento crítico de sostenibilidad" significa abrirse a los diversos potenciales y restricciones que fluyen de las preocupaciones contextualizadas de sostenibilidad. Una de las principales rupturas propuestas por la intensificación ecológica es el alejamiento de la regulación química que marcó la fuerza impulsora del desarrollo agrícola durante la revolución industrial y hacia la regulación biológica. Tal movimiento refuerza la importancia de los contextos locales y las especificidades. Aunque se trata con mayor frecuencia de prácticas agrícolas tradicionales de pequeños propietarios, los métodos agroecológicos han demostrado cómo se puede atender, comprender, proteger y celebrar el contexto por derecho propio (Gliessman 2014). Los estudios de ecosistemas "reales" en toda su complejidad contextual pueden conducir a un "sentimiento por el ecosistema", crítico para la búsqueda de la comprensión y la gestión de los procesos de producción de alimentos (Carpenter 1996). La relevancia de las ideas agroecológicas no tiene por qué limitarse a "la granja"; La naturaleza de los sistemas de acuaponia de circuito cerrado exige un "equilibrio" de agentes ecológicos co-

dependientes (peces, plantas, microbiomas) dentro de los límites y posibilidades de cada sistema en particular. Si bien el microbioma de los sistemas de acuaponía recién comienza a analizarse (Schmautz et al.2017), se espera que la complejidad y el dinamismo excedan los sistemas de recirculación de la acuicultura, cuya microbiología se ve afectada por el tipo de alimento y el régimen de alimentación, las rutinas de manejo, los peces microflora asociada, parámetros de agua de reposición y presión de selección en los biofiltros (Blancheton et al. 2013). Lo que podría considerarse como "simple" en comparación con otros métodos de cultivo, el ecosistema de los sistemas de acuaponia es dinámico y requiere cuidado. El desarrollo de una "ecología del lugar", donde el contexto es intencional y con un compromiso cuidadoso, puede servir como una fuerza creativa en la investigación, incluida la comprensión científica (Thrift 1999; Beatley y Manning 1997). La dinámica biofísica y ecológica de los sistemas de acuaponia es fundamental para la concepción completa de la acuaponía, pero los potenciales de sostenibilidad y seguridad alimentaria no se derivan únicamente de estos parámetros. Como König et al. (2016) señalan, para los sistemas de acuaponia: "diferentes entornos afectan potencialmente la entrega de todos los aspectos de la sostenibilidad: económico, ambiental y social" (König et al. 2016). El enorme potencial de configuración de la acuaponia —desde miniatura a hectáreas, desde extensivo a intensivo, desde básico a sistemas de alta tecnología— es bastante atípico en todas las tecnologías de producción de alimentos (Rakocy et al. 2006). El carácter integrador y la plasticidad física de los sistemas acuaponicos significa que la tecnología se puede implementar en una amplia variedad de aplicaciones. Esto, creemos, es precisamente la fuerza de la tecnología acuaponica dada la naturaleza diversa y heterogénea de las preocupaciones de sostenibilidad y seguridad alimentaria en el Antropoceno, la gran adaptabilidad, o incluso la 'piratería' (Delfanti 2013), de la acuaponía ofrece mucho potencial para desarrollar la producción de alimentos 'personalizados' (Reynolds et al. 2014) que se adapta explícitamente a las demandas ambientales, culturales y nutricionales del lugar.

Los sistemas acuaponicos prometen vías de producción de alimentos que podrían estar dirigidas hacia los límites locales de asimilación de recursos y desechos, la disponibilidad material y tecnológica, las demandas laborales y de mercado. Es por esta razón que la búsqueda de resultados de sostenibilidad puede involucrar diferentes vías de desarrollo tecnológico que dependen del entorno local (Coudel et al. 2013). Este es un punto que está comenzando a recibir un reconocimiento cada vez mayor, y algunos comentaristas afirman que la urgencia de la sostenibilidad global y los problemas de seguridad alimentaria en el Antropoceno exigen un enfoque

abierto y multidimensional de la innovación tecnológica. Por ejemplo, Foley et al. (2011: 5) afirman: 'La búsqueda de soluciones agrícolas debe permanecer neutral en cuanto a tecnología. Existen múltiples caminos para mejorar la producción, la seguridad alimentaria y el desempeño ambiental de la agricultura, y no debemos encerrarnos en un solo enfoque a priori, ya sea agricultura convencional, modificación genética o agricultura orgánica '(5) (Foley et al. 2011). Destacaríamos este punto para la acuaponia, como König et al. (2018: 241) ya lo han hecho: 'hay varios problemas de sostenibilidad que la acuaponía podría abordar, pero que pueden ser imposibles de cumplir en la configuración de un sistema. Por lo tanto, las vías futuras siempre tendrán que involucrar una diversidad de enfoques " Pero la adaptabilidad de la acuaponia podría verse como una espada de doble filo. La inspiración para soluciones de sostenibilidad específicas "a medida" trae consigo la dificultad de generalizar el conocimiento acuaponico para propósitos repetibles y de mayor escala. Los sistemas de acuaponía exitosos responden a las especificidades locales en clima, mercado, conocimiento, recursos, etc. (Villarroel et al.2016; Love et al.2015; Laidlaw y Magee 2016), pero esto significa que los cambios a escala no pueden proceder fácilmente del fractal. replicación de historias de éxito locales no reproducibles. Teniendo en cuenta cuestiones similares a estas, otras ramas de la investigación de intensificación ecológica han sugerido que se debe cuestionar la expresión "ampliación" (Caron et al. 2014). En cambio, la intensificación ecológica está comenzando a ser vista como una transición de procesos multiescalares, todos los cuales siguen procesos biológicos, ecológicos, administrativos y políticos.

'Propias reglas' y genera necesidades de compensación únicas (Gunderson 2001). Comprender e intervenir en sistemas complejos como este presenta enormes desafíos para nuestra investigación, que está orientada a la producción de "conocimiento experto", a menudo diseñado en el laboratorio y aislado de estructuras más amplias. El complejo problema de la seguridad alimentaria está plagado de incertidumbres que no pueden resolverse adecuadamente recurriendo a los ejercicios de resolución de acertijos de la "ciencia normal" de Kuhnian (Funtowicz y Ravetz 1995). La necesidad de tener en cuenta la "especificidad" y la "generalidad" en cuestiones complejas sostenibles produce grandes dificultades metodológicas, organizativas e institucionales. La sensación es que para cumplir con los objetivos de sostenibilidad y seguridad alimentaria contextualizados, el conocimiento "universal" debe estar conectado con el conocimiento "basado en el lugar" (Funtowicz y Ravetz 1995). Para Caron et al. (2014), esto significa que" Los científicos aprenden a ir y venir continuamente ..." entre estas dos dimensiones,"... tanto para formular su pregunta de investigación como para capitalizar sus resultados ... La

confrontación y la hibridación entre fuentes heterogéneas de conocimiento es, por lo tanto, esencial" (Caron et al. 2014). La investigación debe abrirse a círculos más amplios de partes interesadas y sus flujos de conocimiento.

Dado el gran desafío en todas las cuentas que conlleva tal esquema, una tentadora resolución se puede encontrar en el desarrollo de técnicas de cultivo acuaponico más avanzadas "controladas por el medio ambiente". Tales sistemas funcionan eliminando las influencias externas en la producción, maximizando la eficiencia minimizando la influencia de variables subóptimas y específicas de la ubicación (Davis 1985). Pero cuestionamos este enfoque en varias cuentas. Dado que el impulso de tales sistemas radica en amortiguar la producción de alimentos a partir de "inconsistencias localizadas", siempre existe el riesgo de que las necesidades localizadas de sostenibilidad y seguridad alimentaria también se puedan externalizar del diseño y la gestión del sistema. Cortar anomalías localizadas en la búsqueda de El "sistema perfecto" ciertamente debe ofrecer potenciales de eficiencia tentadores en el papel, pero tememos que este tipo de resolución de problemas pase por alto la problemática de generalidad específica de la ciudad de los problemas de sostenibilidad en el Antropoceno sin confrontarlos. En lugar de un remedio, el resultado puede ser una extensión del enfoque dislocado de "una talla para todos" para la producción de alimentos que marcó la Revolución Verde.

Investigación actual sobre acuaponia que sigue a cualquiera de las escuelas informales de "Desacoplar" o "cerrar el ciclo" bien podría ser un ejemplo de tales marcos. Al empujar los límites de productividad de cualquier lado de la producción (acuicultura o hidrocultura), compromisos operativos inherentes de la acuaponía ecológica El principio se hace más evidente y se ve como barreras a la productividad que deben superarse. Enmarcar el problema de acuaponia de esta manera da como resultado soluciones que involucran más tecnología: válvulas unidireccionales patentadas, trampas de condensación, oxigenadores de alta tecnología, iluminación LED, dispensadores de nutrientes adicionales, concentradores de nutrientes, etc. Estas instrucciones repiten la dinámica del conocimiento de la agricultura industrial moderna que concentró excesivamente la experiencia y el poder de los sistemas de producción de alimentos en manos de científicos aplicados dedicados al desarrollo de insumos, equipos y gestión remota de sistemas. No estamos seguros de cómo tales medidas tecnocráticas podrían encajar dentro de una ética de investigación que coloca primero la sostenibilidad. Este no es un argumento contra los sistemas de alta tecnología y entorno cerrado; simplemente esperamos enfatizar que dentro de un primer paradigma de sostenibilidad, nuestras

tecnologías de producción de alimentos deben justificarse sobre la base de generar resultados de sostenibilidad alimentaria y seguridad alimentaria específicos del contexto.

Comprender que la sostenibilidad no puede eliminarse de las complejidades del contexto o de las posibilidades del lugar es reconocer que el "conocimiento experto" por sí solo no puede considerarse garante de resultados sostenibles. Esto plantea un desafío para los modos de producción de conocimiento centralizados basados en experimentos bajo condiciones controladas y la forma en que la ciencia podría contribuir a los procesos de innovación (Bäckstrand 2003). Aquí es crucial el diseño de sistemas metodológicos que garanticen que tanto la solidez como la genéricaidad del conocimiento científico se mantengan junto con su relevancia para las condiciones locales. Pasar a concepciones como esta requiere un gran cambio en nuestros esquemas actuales de producción de conocimiento y no solo implica una mejor integración de las ciencias agronómicas con las humanas y políticas, sino que sugiere un camino de coproducción de conocimiento que va mucho más allá de la "interdisciplinariedad" (Lawrence2015).

Aquí es importante enfatizar el punto de Bäckstrand (2003: 24) de que la incorporación del conocimiento laico y práctico en los procesos científicos 'no descansa en la suposición de que el conocimiento laico es necesariamente "más verdadero", "mejor" o "más verde". . Más bien, como Leach et al. (2012: 4) señalan que se deriva de la idea de que "fomentar enfoques y formas de innovación más diversos (tanto sociales como tecnológicos) nos permite responder a la incertidumbre y la sorpresa que surgen de los choques y tensiones biofísicos y socioeconómicos complejos e interactivos" . Frente a la incertidumbre de los resultados ambientales futuros en el Antropoceno, una multiplicidad de perspectivas puede evitar el estrechamiento de alternativas. A este respecto, la riqueza potencial de la experimentación que se produce en proyectos de "patio trasero" y comunitarios en toda Europa representa un recurso sin explotar que hasta ahora ha recibido poca atención de los círculos de investigación. "El sector de pequeña escala ..." Konig et al. (2018: 241) observa,'... muestra optimismo y un sorprendente grado de autoorganización a través de Internet. Puede haber espacio para crear innovaciones sociales adicionales ". Dada la naturaleza multidimensional de los problemas en el Antropoceno, las innovaciones de base, como el sector de acuaponia en el patio trasero, se basan en el conocimiento y la experiencia locales y trabajan hacia formas de innovación social y organizativa que son, a los ojos de Leach et al. (2012: 4), "al menos tan crucial como la ciencia y la tecnología avanzadas". La vinculación con grupos comunitarios de acuaponia potencialmente ofrece

acceso a grupos de alimentos locales vibrantes, gobiernos locales y consumidores locales que a menudo están entusiasmados con las perspectivas de colaboración con los investigadores. Vale la pena señalar que en un clima de financiamiento cada vez más competitivo, las comunidades locales ofrecen una gran cantidad de recursos (intelectuales, físicos y monetarios) que a menudo se pasan por alto, pero que pueden complementar los flujos de financiamiento de investigación más tradicionales (Reynolds et al. 2014) .

Como sabemos, en la actualidad, los proyectos comerciales a gran escala enfrentan altos riesgos de comercialización, plazos estrictos de financiamiento y una alta complejidad tecnológica y administrativa que dificulta la colaboración con organizaciones de investigación externas. Debido a esto, estaríamos de acuerdo con König et al. (2018) que encuentran ventajas para la experimentación con sistemas más pequeños que han reducido la complejidad y están sujetos a menos regulaciones legales. El campo debe impulsar la integración de estas organizaciones en marcos participativos de investigación de ciencia ciudadana, permitiendo que la investigación académica se mezcle más a fondo con las formas de acuaponia que funcionan en el mundo. En ausencia de medidas y protocolos de sostenibilidad formalizados, las empresas acuaponicas se arriesgan a problemas de legitimación cuando sus productos se comercializan con pretensiones de sostenibilidad. Una posibilidad clara de colaboraciones de investigación participativa sería la producción conjunta de needed objetivos de sostenibilidad específicos de la situación 'muy necesarios para instalaciones que podrían formar la' base para el diseño del sistema 'y aportar' una estrategia de marketing clara " (König et al. 2018). Trabajar hacia resultados como estos también podría mejorar la transparencia, la legitimidad y la relevancia de nuestros esfuerzos de investigación (Bäckstrand 2003). El clima de financiación de la investigación europea ha comenzado a reconocer la necesidad de cambiar la orientación de la investigación al incluir el requisito en las recientes convocatorias de financiación de proyectos de implementar los llamados "laboratorios vivos" en proyectos de investigación (Robles et al.2015).

A partir de junio de 2018, el proyecto Horizon 2020 proGIreg (H2020-SCC-2016-2017) incluirá un laboratorio viviente para la implementación ejemplar de los llamados sistemas basados en la naturaleza (NBS), uno de los cuales será un sistema acuaponico diseñado, construido y operado por la comunidad en un sistema solar pasivo invernadero. El proyecto, con 36 socios en 6 países, tiene como objetivo encontrar formas innovadoras de utilizar productivamente la infraestructura verde de los entornos urbanos y periurbanos, basándose en los conceptos de coproducción desarrollados

en su proyecto hermano actualmente en ejecución, CoProGrün.

Los paquetes de trabajo de los investigadores con respecto a la parte de acuaponia del proyecto se triplicarán. Una parte consistirá en elevar el llamado nivel de preparación tecnológica (TRL) de acuaponia, una tarea de investigación sin colaboración explícita con los laicos y la comunidad. La utilización de recursos de los conceptos actuales de acuaponia y el potencial de optimización de recursos de medidas técnicas adicionales son los objetivos centrales de esta tarea. Si bien a primera vista esta tarea parece seguir el paradigma de productividad y aumento de rendimiento anteriormente criticado, los criterios de evaluación para diferentes medidas incluirán aspectos más multifacéticos, como la facilidad de implementación, la comprensión, la adecuación y la transferibilidad. Un segundo enfoque será el apoyo a los procesos de planificación, construcción y operación de la comunidad, que busca integrar el conocimiento objetivo y la generación de conocimiento profesional. Un metaobjetivo de este proceso será la observación y la moderación de los procesos relevantes de colaboración y comunicación comunitaria. En este enfoque, se espera activamente que la moderación altere la observación, ilustrando una desviación de las rutinas de investigación tradicionales de construcción de hechos y repetibilidad. Un tercer paquete abarca la investigación sobre obstáculos políticos, administrativos, técnicos y financieros. La intención aquí es involucrar a una colección más amplia de partes interesadas, desde políticos y tomadores de decisiones hasta planificadores, operadores y vecinos, con estructuras de investigación desarrolladas para reunir cada una de estas perspectivas específicas. Con suerte, este método más holístico abre un camino hacia el enfoque de "sostenibilidad primero" propuesto en este capítulo.

16.7.3 Preocupación

Reconocer la acuaponia como una forma multifuncional de producción de alimentos enfrenta grandes desafíos. Como se ha discutido, comprender la noción de "agricultura multifuncional" es más que un simple debate crítico sobre lo que constituye el "posproduccionismo" (Wilson 2001); Esto se debe a que busca trasladar la comprensión de nuestro sistema alimentario a posiciones que encapsulan mejor la diversidad, la no linealidad y la heterogeneidad espacial que se reconocen como ingredientes clave para un sistema alimentario sostenible y justo. Es importante recordar que la noción misma de 'multifuncionalidad' en la agricultura surgió durante la década de 1990 como 'una consecuencia de las consecuencias ambientales y sociales no deseadas y en gran medida imprevistas y la limitada rentabilidad de la Política Agrícola Común Europea (PAC), que buscó principalmente impulsar la producción agraria y la productividad de la

agricultura '(270) (Cairol et al. 2009). Comprender que nuestros climas políticos y estructuras institucionales no han sido propicios para el cambio sostenible es un punto que no debemos olvidar.

Como otros han señalado en campos agronómicos adyacentes, comprender y desbloquear la riqueza de las contribuciones de la producción de alimentos al bienestar humano y la salud ambiental necesariamente implicará una dimensión crítica (Jahn 2013). Creemos que esta idea debe aparecer con más fuerza en la investigación en acuaponia. Elegimos la palabra "preocupación" aquí con cuidado. La palabra preocupación conlleva diferentes connotaciones para "crítica". La preocupación conlleva nociones de ansiedad, preocupación y problemas. La ansiedad llega cuando algo interrumpe lo que podría ser una existencia más saludable, feliz o segura. Nos recuerda que investigar en el Antropoceno es reconocer nuestro lugar drásticamente inquietante en el mundo. Que nuestras "soluciones" siempre conllevan la posibilidad de problemas, ya sea éticos, políticos o ambientales. Pero la preocupación tiene más que solo connotaciones negativas. Preocuparse también significa "estar a punto", "relacionarse con" y también "preocuparse". Nos recuerda preguntarnos de qué se trata nuestra investigación. Cómo nuestras preocupaciones disciplinarias se relacionan con otras disciplinas, así como con cuestiones más amplias. De manera crucial, los resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria requieren que nos preocupemos por las preocupaciones de los demás.

Consideraciones como estas constituyen un tercer aspecto de lo que queremos decir cuando pedimos un "Conocimiento crítico de sostenibilidad" para acuaponia. Como comunidad de investigación, es crucial que desarrollemos una comprensión de los factores estructurales que afectan y restringen la innovación social, política y tecnológica efectiva de la acuaponia. El cambio técnico depende de la infraestructura, las capacidades de financiamiento, organizaciones de mercado así como condiciones laborales y de derechos sobre la tierra (Röling 2009). Cuando se asume el papel de este marco más amplio solo como un "entorno propicio", a menudo el resultado es que tales consideraciones quedan fuera del esfuerzo de investigación. Este es un punto que sirve para justificar fácilmente el fracaso de las unidades de desarrollo de arriba hacia abajo basadas en tecnología (Caron 2000). A este respecto, el discurso tecno-optimista de la acuaponía contemporánea, en su incapacidad de aprehender una resistencia estructural más amplia al desarrollo de innovación sostenible, serviría como un ejemplo de caso.

Como una forma potencial importante de intensificación sostenible, la

acuaponia necesita ser reconocida como parte de diferentes formas sociales, económicas y organizativas, y vinculada a ellas, en diversas escalas, potencialmente desde los hogares, la cadena de valor, el sistema alimentario y más allá, incluidos otros niveles políticos. Afortunadamente, recientemente se ha avanzado hacia la atención de las dificultades estructurales más amplias que enfrenta la tecnología acuaponica, con König et al. (2018) que ofrece una visión de la acuaponía a través de un "sistema de innovación tecnológica emergente". König y col. (2018) han mostrado cómo los desafíos para el desarrollo de la acuaponía se derivan de: (1) la complejidad del sistema, (2) el entorno institucional y (3) el paradigma de sostenibilidad que intenta impactar. El campo de investigación acuaponia necesita responder a este diagnóstico.

La lenta absorción y las altas posibilidades de fracaso que la tecnología de acuaponia exhibe actualmente es una expresión de la resistencia social más amplia que hace que la innovación sostenible sea un desafío, así como nuestra incapacidad para organizarnos eficazmente contra tales fuerzas. Como König et al. (2018) señalan que el entorno de alto riesgo que existe actualmente para los empresarios e inversores acuapónicos obliga a las instalaciones de inicio en toda Europa a centrarse en la producción, el marketing y la formación del mercado, en lugar de la entrega de credenciales de sostenibilidad.

En este sentido, Alkemade y Suurs (2012) nos recuerdan que "no se puede confiar en las fuerzas del mercado para realizar las transiciones de sostenibilidad deseadas"; más bien, señalan, se necesita una visión de la dinámica de los procesos de innovación si el cambio tecnológico puede guiarse a lo largo de trayectorias más sostenibles (Alkemade y Suurs 2012).

Las dificultades que enfrentan las empresas acuaponicas en Europa sugieren que el campo actualmente carece de las condiciones de mercado necesarias, con la "aceptación del consumidor", un factor importante que permite el éxito de las nuevas tecnologías de sistemas alimentarios, reconocida como un posible área problemática. A partir de este diagnóstico, se ha planteado el problema de "Educación del consumidor" (Miličić et al. 2017). Junto con esto, enfatizaríamos que la educación colectiva es una preocupación clave para las cuestiones de sostenibilidad del sistema alimentario. Pero cuentas como estas conllevan riesgos. Es fácil recurrir a las concepciones modernistas tradicionales sobre el papel de la ciencia en la sociedad, suponiendo que "si el público entendiera los hechos" sobre nuestra tecnología, elegirían la acuaponía sobre otros métodos de producción de alimentos. Cuentas como estas suponen demasiado, tanto sobre las necesidades de los "consumidores" como sobre el valor y la

aplicabilidad universal del conocimiento experto y la innovación tecnológica. Existe la necesidad de buscar relatos más sutiles y matizados de la lucha por futuros sostenibles que vayan más allá de la dinámica del consumo (Gunderson 2014) y tengan una mayor sensibilidad a las diversas barreras que enfrentan las comunidades para acceder a la seguridad alimentaria e implementar acciones sostenibles (Carolan 2016; Muro 2007).

Obtener información sobre los procesos de innovación pone gran énfasis en nuestras instituciones generadoras de conocimiento. Como hemos discutido anteriormente, los problemas de sostenibilidad exigen que la ciencia se abra a enfoques participativos públicos y privados que impliquen la coproducción de conocimiento. Pero en términos de este punto, vale la pena señalar que hay grandes desafíos pendientes. Como dice Jasanoff (2007: 33): "Incluso cuando los científicos reconocen los límites de sus propias investigaciones, como a menudo lo hacen, el mundo de las políticas, alentado implícitamente por los científicos, solicita más investigación". La suposición generalizada de que un conocimiento más objetivo es la clave para impulsar la acción hacia la sostenibilidad va en contra de los hallazgos de la ciencia de la sostenibilidad. Los resultados de sostenibilidad son en realidad procesos de conocimiento deliberativo más estrechamente ligados: crear una mayor conciencia de las formas en que expertos y profesionales enmarcan los problemas de sostenibilidad; los valores incluidos y excluidos; así como formas efectivas de facilitar la comunicación de diversos conocimientos y tratar el conflicto cuando surja (Smith y Stirling 2007; Healey 2006; Miller y Neff 2013; Wiek et al. 2012). Como Miller et al. (2014) señalan que la continua dependencia del conocimiento objetivo para juzgar los problemas de sostenibilidad representa la persistencia de la creencia modernista en la racionalidad y el progreso que suscribe a casi todas las instituciones generadoras de conocimiento (Horkheimer y Adorno 2002; Marcuse 2013).

Es aquí donde el desarrollo de un conocimiento crítico de sostenibilidad para acuaponia cambia nuestra atención a nuestros propios entornos de investigación. Nuestro cada vez más las instituciones de investigación 'neoliberalizadas' exhiben una tendencia preocupante: el retroceso de los fondos públicos para las universidades, la creciente presión para obtener resultados a corto plazo, la separación de las misiones de investigación y enseñanza, la disolución del autor científico la contracción de las agendas de investigación para centrarse en las necesidades de los actores comerciales, una dependencia cada vez mayor de la aceptación del mercado para juzgar disputas intelectuales y la intensa fortificación de la propiedad intelectual en el esfuerzo por comercializar el conocimiento,

todo lo cual ha demostrado tener un impacto en la producción y difusión de nuestro investigación, y de hecho todos son factores que impactan la naturaleza de nuestra ciencia (Lave et al. 2010).

Una pregunta que debe ser confrontada es si nuestros entornos de investigación actuales son aptos para el examen de la sostenibilidad compleja y los objetivos de seguridad alimentaria a largo plazo que deben ser parte de la investigación acuaponica. Este es el punto clave que quisiéramos enfatizar: si la sostenibilidad es el resultado de una deliberación y acción colectiva multidimensional, nuestros propios esfuerzos de investigación, que forman parte integral del proceso, deben verse como algo que también se puede innovar hacia resultados de sostenibilidad. El proyecto proGIreg de Horizonte 2020 mencionado anteriormente puede ser un ejemplo de algunos primeros pasos ambiciosos hacia la creación de nuevos entornos de investigación, pero debemos trabajar duro para evitar que el proceso de investigación se pierda de vista. Pueden surgir preguntas sobre cómo estas medidas potencialmente revolucionarias de los "laboratorios vivos" podrían implementarse desde las lógicas de financiación tradicionales. Por ejemplo, los enfoques participativos hacen hincapié en la importancia conceptual de los resultados abiertos, al mismo tiempo que requieren que el gasto previsto de dichos laboratorios vivos esté predefinido. Encontrar formas productivas de las barreras institucionales tradicionales es una preocupación siempre presente. Ya no se puede considerar que nuestros entornos de investigación modernos tengan un aislamiento privilegiado de los problemas más amplios de la sociedad. Más que nunca nuestro Las biociencias impulsadas por la innovación están implicadas en las preocupaciones agrarias del Antropoceno (Braun y Whatmore 2010). El campo de los Estudios de Ciencia y Tecnología nos enseña que las innovaciones tecnocientíficas vienen con implicaciones ético-políticas serias. Una discusión de 30 años en este campo ha ido más allá de la idea de que las tecnologías son simplemente 'utilizadas' o 'mal utilizadas' por diferentes intereses sociopolíticos después de que el hardware ha sido 'estabilizado' o legitimado a través de la experimentación objetiva en espacios de laboratorio neutros. (Latour 1987; Pickering 1992). La visión "constructivista" en los análisis de STS va más allá de la identificación de la política dentro de los laboratorios (Law y Williams 1982; Latour y Woolgar 1986 [1979]) para mostrar que las tecnologías que producimos no son objetos "neutrales" sino que de hecho están infundidas con capacidades de "creación de mundo" y consecuencia política.

Los sistemas de acuaponia que ayudamos a innovar están llenos de capacidad de producción futura, pero las consecuencias de la innovación

tecnológica rara vez son objeto de estudio. Parafraseando a Winner (1993), lo que significa la introducción de nuevos artefactos para el sentido de sí mismo de las personas, para la textura de las comunidades humanas / no humanas, para las cualidades de la vida cotidiana dentro de la dinámica de la sostenibilidad y para la distribución más amplia del poder en la sociedad, estos tradicionalmente no han sido asuntos de preocupación explícita. Cuando los estudios clásicos (Winner 1986) hacen la pregunta "¿Los artefactos tienen política?", Esto no es solo un llamado a producir exámenes más precisos de la tecnología al incluir la política en las cuentas de las redes de usuarios y partes interesadas, aunque esto es ciertamente necesario; También nos concierne a los investigadores, nuestros modos de pensamiento y ethos que afectan la política (o no) que atribuimos a nuestros objetos (de la Bellacasa 2011; Arboleda 2016). Las académicas feministas han destacado cómo las relaciones de poder están inscritas en la estructura misma del conocimiento científico moderno y sus tecnologías. Contra formas de conocimiento alienadas y abstractas, han innovado enfoques teóricos y metodológicos clave que buscan reunir visiones objetivas y subjetivas del mundo y teorizar sobre la tecnología desde el punto de partida de la práctica (Haraway 1997; Harding 2004). Consciente de estos puntos, Jasanoff (2007) pide el desarrollo de lo que ella llama "tecnologías de humildad":'La humildad nos instruye a pensar más detenidamente sobre cómo replantear los problemas para que sus dimensiones éticas salgan a la luz, qué nuevos hechos buscar y cuándo resistirse a pedir una aclaración a la ciencia. La humildad nos dirige a aliviar las causas conocidas de la vulnerabilidad de las personas a los daños, a prestar atención a la distribución de riesgos y beneficios, y a reflexionar sobre los factores sociales que promueven o desalientan el aprendizaje ". Un primer paso importante para que nuestro campo dé un paso hacia la comprensión de los potenciales políticos de nuestra tecnología sería alentar la expansión del campo hacia áreas críticas de investigación que actualmente están subrepresentadas. Al otro lado del Atlántico, en los Estados Unidos y Canadá, ya se han realizado movimientos similares como este, donde un enfoque interdisciplinario se ha convertido progresivamente en el campo crítico de la ecología política (Allen 1993). Dichos proyectos no solo apuntan a combinar patrones de agricultura y uso de la tierra con tecnología y ecología, sino que además enfatizan la integración de factores socioeconómicos y políticos (Caron et al.2014). La comunidad de investigación en acuaponia en los Estados Unidos ha comenzado a reconocer los recursos en expansión de la investigación sobre la soberanía alimentaria, explorando cómo las comunidades urbanas pueden volver a comprometerse con los principios de sostenibilidad, mientras toman más control sobre su producción y distribución de alimentos (Laidlaw y Magee 2016). La soberanía

alimentaria se ha convertido en un gran tema que busca precisamente intervenir en los sistemas alimentarios que están sobredeterminados por el desempoderamiento de las relaciones capitalistas. Desde la perspectiva de la soberanía alimentaria, el control corporativo del sistema alimentario y la mercantilización de los alimentos se consideran amenazas predominantes para la seguridad alimentaria y el medio ambiente (Nally 2011). Seguiríamos la opinión de Laidlaw y Magee (2016) de que las empresas de acuaponia basadas en la comunidad "representan un nuevo modelo de cómo combinar la agencia local con la innovación científica para brindar soberanía alimentaria en las ciudades".

Desarrollar un "conocimiento crítico de sostenibilidad" para acuaponia significa resistirse a la opinión de que la sociedad y sus instituciones son simplemente dominios neutrales que facilitan la progresión lineal hacia la innovación sostenible. Muchas ramas de las ciencias sociales han contribuido a una imagen de la sociedad que está impregnada de relaciones de poder asimétricas, un sitio de disputa y lucha. Una de esas luchas se refiere al significado y la naturaleza de la sostenibilidad. Los puntos de vista críticos de campos más amplios subrayarían que la acuaponia es una tecnología madura con potencial político y limitación. Si nos tomamos en serio las credenciales de sostenibilidad y seguridad alimentaria de la acuaponía, es crucial que examinemos más a fondo cómo nuestras expectativas de esta tecnología se relacionan con la experiencia en el terreno y, a su vez, encontramos formas de integrar esto nuevamente en los procesos de investigación.

Seguimos a Leach et al. (2012) aquí quienes insisten en la necesidad de consideraciones más finas con respecto al desempeño de las innovaciones sostenibles. Además de las afirmaciones, quién o qué se beneficiará de tales intervenciones debe ocupar un lugar central en el proceso de innovación acuaponia. Por último, como los autores de Chap. He dejado en claro que la búsqueda de un cambio de paradigma duradero requerirá la capacidad de colocar nuestra investigación en circuitos de políticas que hagan que los entornos legislativos sean más propicios para el desarrollo de acuaponia y permitan un cambio a mayor escala. La política de influencia requiere una comprensión de la dinámica del poder y los sistemas políticos que permiten y socavan el cambio hacia soluciones sostenibles.

16.8 CONCLUSIÓN: INVESTIGACIÓN EN ACUAPONIA EN EL ANTROPOCENO

Las presiones socio-biofísicas de y sobre nuestro sistema alimentario

convergen en el Antropoceno hacia lo que se considera una tarea sin precedentes para la comunidad global, que requiere "nada menos que una revolución alimentaria planetaria" (Rockström et al. 2017). El Antropoceno requiere innovaciones en la producción de alimentos que excedan los paradigmas tradicionales, mientras que al mismo tiempo pueden reconocer la complejidad que surge de los problemas de sostenibilidad y seguridad alimentaria que marcan nuestros tiempos. Aquaponics es una innovación tecnológica que promete contribuir mucho a estos imperativos. Pero este campo emergente se encuentra en una etapa temprana que se caracteriza por los recursos limitados, la incertidumbre del mercado, la resistencia institucional y los altos riesgos de fracaso, un entorno de innovación donde prevalece la exageración resultados demostrados La comunidad de investigación en acuaponia potencialmente ocupa un lugar importante en la ruta de desarrollo de esta tecnología. Como comunidad de investigación en acuaponia, necesitamos crear visiones viables para el futuro.

Proponemos una visión de este tipo cuando pedimos una investigación de "sostenibilidad primero" programa. Nuestra visión sigue el diagnóstico de Rockström et al. (2017) de que el cambio de paradigma requiere alejar la ética de la investigación de los medios productivos tradicionales para que la sostenibilidad se convierta en el lugar central del proceso de innovación. Esta tarea es enorme porque la naturaleza multidimensional y ligada al contexto de los problemas de sostenibilidad y seguridad alimentaria es tal que no pueden resolverse únicamente por medios técnicos. Las dimensiones éticas y cargadas de valor de la sostenibilidad requieren un compromiso para enfrentar las complejidades, la incertidumbre, la ignorancia y la contestación que se derivan de tales problemas. Todo esto impone grandes exigencias al conocimiento que producimos; no solo cómo lo distribuimos e intercambiamos, sino también su propia naturaleza.

Proponemos que el campo de acuaponia necesita buscar un "conocimiento crítico de sostenibilidad". Cuando König et al. (2018) preguntan qué ajustes de experimentación de sostenibilidad serían necesarios para permitir que la ciencia, los negocios, las políticas y los consumidores 'respondan preguntas de sostenibilidad sin repetir la ruta de desarrollo de [RAS o hidroponía]', el punto es claro: debemos aprender de fracasos del pasado. El clima neoliberal actual es uno que constantemente abre la discusión de 'sostenibilidad' hasta la (mala) apropiación, ya que 'el agronegocio moviliza sus recursos en un intento de dominar el discurso y hacer que su significado de "agricultura alternativa" sea el significado universal' (Kloppenburg 1991) Necesitamos construir un conocimiento crítico de sostenibilidad que sea sabio hasta los límites de las rutas tecnocráticas

hacia la sostenibilidad, que sea sensible al potencial político de nuestras tecnologías, así como a las formas estructurales de resistencia que limitan su desarrollo.

Un conocimiento crítico de sostenibilidad crea conciencia de los límites de sus propias vías de conocimiento y se abre a esas otras corrientes de conocimiento que a menudo se dejan de lado en un intento de expandir la comprensión científica y la capacidad tecnológica. Este es un llamado a la interdisciplinariedad y la profundidad que aporta, pero va más allá de esto. Los resultados de sostenibilidad y seguridad alimentaria tienen poco impacto si solo se pueden generar en el laboratorio. La investigación debe contextualizarse: necesitamos "producir e integrar el conocimiento científico en los sistemas locales de innovación" (51) (Caron et al. 2014). Construir vínculos coproductivos con las comunidades de acuaponia ya existentes en la sociedad significa forjar las estructuras sociales e institucionales que pueden permitir a nuestras comunidades aprender y adaptarse continuamente a nuevos conocimientos, valores, tecnologías y cambios ambientales. Juntos, debemos deliberar sobre las visiones y los valores de nuestras comunidades y explorar las posibles vías sociotécnicas que podrían realizar tales visiones. En el centro de esto, necesitamos sistemas de organización y prueba de las afirmaciones de sostenibilidad y seguridad alimentaria que se hacen con esta tecnología (Pearson et al. 2010; Nugent 1999) para que una mayor transparencia y legitimación puedan ser llevadas a todo el campo: empresarios, empresas, investigadores y activistas por igual.

Si todo esto parece una tarea difícil, es porque lo es. El Antropoceno exige un gran replanteamiento de la forma en que se organiza la sociedad, y nuestro sistema alimentario es fundamental para esto. Creemos que existe la posibilidad de que la acuaponía tenga un papel que desempeñar en esto. Pero si nuestras esperanzas no son perderse en la burbuja exagerada de la charla hueca de sostenibilidad que marca nuestros tiempos neoliberales, tenemos que demostrar que la acuaponía ofrece algo diferente. Como comentario final, revisamos el punto de de la Bellacasa (2015) que: 'La intensificación agrícola no es solo una orientación cuantitativa (aumento del rendimiento), sino implica una "forma de vida" '. Si este es el caso, entonces la búsqueda de una intensificación sostenible exige que encontremos una nueva forma de vida. Necesitamos soluciones de sostenibilidad que reconozcan este hecho e investiguen a las comunidades que responden a él.

[1] Por ejemplo, considere la siguiente declaración emitida por Monsanto: 'Los principales usos de los cultivos GM son hacerlos tolerantes a los

insecticidas y herbicidas. No aumentan inherentemente el rendimiento. Protegen el rendimiento ". Citado en E. Ritch, "Monsanto contraataca en Alemania, UCS", Cleantech.com (17 de abril de 2009). Acceso en julio 18 de 2009.

[2] Aquí son especialmente importantes los efectos del cambio climático, así como la

Fenómeno de "super hierba" de plagas cada vez más resistentes que disminuyen significativamente los rendimientos.

[3] El discurso productivista ignora invariablemente el de Amartya Sen (1981, 154; Roberts 2008, 263; PMA 2009, 17) punto clásico de que el volumen y la disponibilidad de alimentos por sí solos no es una explicación suficiente de la persistencia del hambre en el mundo. Está bien establecido que existe suficiente comida para alimentar a más de la población actual del mundo (OCDE 2009, 21).

[4] Aunque los cálculos son complejos y controvertidos, una estimación común es que la agricultura industrial requiere un promedio de 10 calorías de combustibles fósiles para producir una sola caloría de alimentos (Manning 2004), que podría aumentar a 40 calorías en carne de res (Pimentel 1997) .

[5] Las externalidades de nuestro sistema alimentario actual a menudo se ignoran o se subsidian en gran medida. Moore (2015: 187) describe la situación como "una especie de" servicios ecosistémicos "a la inversa": "Hoy en día, se usan mil millones de libras de pesticidas y herbicidas cada año en la agricultura estadounidense. Los reconocidos impactos en la salud han sido ampliamente estudiados. Aunque la traducción de tales "externalidades" en el registro de acumulación es imprecisa, su escala es impresionante, totalizando casi $ 17 mil millones en costos no pagados para la agricultura estadounidense a principios del siglo XXI. Sobre externalidades ver: Tegtmeier y Duffy (2004).

REFERENCIAS

Abson DJ, Fischer J, Leventon J, Newig J, Schomerus T, Vilsmaier U, von Wehrden H, Abernethy P, Ives CD, Jager NW (2017) Leverage points for sustainability transformation. Ambio 46:30–39

Alexandratos N, Bruinsma J (2012) World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision, ESA working paper. FAO, Rome

Alkemade F, Suurs RA (2012) Patterns of expectations for emerging sustainable technologies. Technol Forecast Soc Chang 79:448–456

Allen P (1993) Food for the future: conditions and contradictions of sustainability. Wiley, Chichester

Altieri MA (1998) Ecological impacts of industrial agriculture and the possibilities for truly sustainable farming. Mon Rev 50:60

Altieri MA (2007) Fatal harvest: old and new dimensions of the ecological tragedy of modern agriculture. In: Sustainable resource management. Edward Elgar, Londres, pp 189–213
Altvater E, Crist E, Haraway D, Hartley D, Parenti C, Mcbrien J (2016) Anthropocene or capitalocene?: nature, history, and the crisis of capitalism. PM Press, Oakland
Ansell C, Gash A (2008) Collaborative governance in theory and practice. J Public Adm ResTheory 18:543–571
Arboleda M (2016) Revitalizing science and technology studies: a Marxian critique of more-than- human geographies. Environt Plan D Soc Space 35:360–378. https://doi.org/10.1177/0263775816664099
Assessment ME (2003) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis; a report of the millennium ecosystem assessment. Island Press, Washington, DC
Bäckstrand K (2003) Civic science for sustainability: reframing the role of experts, policy-makers and citizens in environmental governance. Glob Environ Politics 3:24–41
Battisti DS, Naylor RL (2009) Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. Science 323:240–244
Baulcombe D, Crute I, Davies B, Dunwell J, Gale M, Jones J, Pretty J, Sutherland W, Toulmin C (2009) Reaping the benefits: science and the sustainable intensification of global agriculture. The Royal Society, London
Beatley T, Manning K (1997) The ecology of place: planning for environment, economy, and community. Island Press, Washington, DC
Blancheton J, Attramadal K, Michaud L, D'Orbcastel ER, Vadstein O (2013) Insight into bacterial population in aquaculture systems and its implication. Aquac Eng 53:30–39
Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. Trends Ecol Evol 28:230–238
Bradley A (2011) Originary technicity: the theory of technology from Marx to Derrida. Palgrave Macmillan Basingstoke, Hants
Braun B, Whatmore SJ (2010) Political matter: technoscience, democracy, and public life. Univer- sity of Minnesota Press, Minneapolis
Brewer GD (2007) Inventing the future: scenarios, imagination, mastery and control. Sustain Sci 2:159–177
Bringezu S, Schütz H, Pengue W, O'Brien M, Garcia F, Sims R, Howarth RW, Kauppi L, Swilling M, Herrick J (2014) Assessing global land use: balancing consumption with sustain- able supply. United Nations Environment Programme, Nairobi
Brooks S, Leach M, Millstone E, Lucas H (2009) Silver bullets, grand challenges and the new philanthropy. STEPS Centre, Brighton
Brussaard L, Caron P, Campbell B, Lipper L, Mainka S, Rabbinge R, Babin D, Pulleman M (2010) Reconciling biodiversity conservation and food

security: scientific challenges for a new agri- culture. Curr Opin Environ Sustain 2:34–42
Câmpeanu CN, Fazey I (2014) Adaptation and pathways of change and response: a case study from Eastern Europe. Glob Environ Chang 28:351–367
Cairol D, Coudel E, Knickel K, Caron P, Kröger M (2009) Multifunctionality of agriculture and rural areas as reflected in policies: the importance and relevance of the territorial view. J Environ Policy Plan 11:269–289
Cardinale BJ, Duffy JE, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S (2012) Biodiversity loss and its impact on humanity. Nature 486:59–67
Carolan M (2016) Adventurous food futures: knowing about alternatives is not enough, we need to feel them. Agric Hum Values 33:141–152
Caron P (2000) Decentralisation and multi-levels changes: challenges for agricultural research to support co-ordination between resource poor stakeholders and local governments
Caron P, Biénabe E, Hainzelin E (2014) Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: the gaps in and the role of scientific knowledge. Curr Opin Environ Sustain 8:44–52
Caron P, Reig E, Roep D, Hediger W, Cotty T, Barthelemy D, Hadynska A, Hadynski J, Oostindie H, Sabourin E (2008) Multifunctionality: refocusing a spreading, loose and fashion- able concept for looking at sustainability? Int J Agric Resour Gov Ecol 7:301–318
Carpenter SR (1996) Microcosm experiments have limited relevance for community and ecosystem ecology. Ecology 77:677–680
Castree N (2015) Changing the Anthropo (s) cene geographers, global environmental change and the politics of knowledge. Dialogues Hum Geogr 5:301–316
Churchman CW (1979) The systems approach and its enemies. Basic Books, New York
Cohen T (2012) Anecographics: climate change and "Late" deconstruction. In: Impasses of the post-global: theory in the era of climate change, vol 2. Open Humanities Press, London, pp 32–57
Cohen T (2013) Telemorphosis: theory in the era of climate change, vol 1. Open Humanities Press
Collings DA (2014) Stolen future, broken present: the human significance of climate change. Open Humanities Press, London
Cooper M (2008) Life as surplus: biotechnology and capitalism in the neoliberal era. University of Washington Press, Seattle
COST (2013) Memorandum of understanding for the implementation of a European Concerted Research Action designated as COST Action FA1305: The EU Aquaponics Hub: realising sustainable integrated fish and vegetable production for the EU. European Cooperation in the field of

Scientific and Technical Research – COST, Brussels
Cota GM (2011) Introduction: the posthuman life of agriculture. In: Cota GM (ed) Another technoscience is possible: agricultural lessons for the Posthumanities. Open Humanities Press, London
Coudel E, Devautour H, Soulard C-T, Faure G, Hubert B (2013) Renewing innovation systems in agriculture and food: how to go towards more sustainability? Wageningen Academic Pub- lishers, Wageningen
Crutzen PJ, Stoermer EF (2000a) The "Anthropocene". Global Change Newsl 41:17–18. Interna- tional Geosphere–Biosphere Programme (IGBP)
Crutzen PJ, Stoermer EF (2000b) Global change newsletter. Anthropocene 41:17–18
Davis N (1985) Controlled-environment agriculture-past, present and future. Food Technol 39:124–126
de La Bellacasa MP (2011) Matters of care in technoscience: assembling neglected things. Soc Stud Sci 41:85–106
de La Bellacasa MP (2015) Making time for soil: Technoscientific futurity and the pace of care. Soc Stud Sci 45:691–716
de Laet M, Mol A (2000) The Zimbabwe bush pump: mechanics of a fluid technology. Soc Stud Sci 30:225–263
Delaide B, Delhaye G, Dermience M, Gott J, Soyeurt H, Jijakli MH (2017) Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF box, a small-scale aquaponic system. Aquac Eng 78:130
Delfanti A (2013) Biohackers. The politics of open science. Pluto Press, London
Desa U (2015) World population prospects: the 2015 revision, key findings and advance tables. Working Paper No Rep, No. ESA/P/WP. 241
Dobbs R, Oppenheim J, Thompson F, Brinkman M, Zornes M (2011) Resource revolution: meeting the world's energy, materials, food, and water needs. McKinsey & Company, London
Elzen, B, Janssen A, Bos A (2017) Portfolio of promises: designing and testing a new tool totimulate transition towards sustainable agriculture. AgroEcological transitions. Wageningen University & Research
Evenson RE, Gollin D (2003) Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000. Science 300:758–76
FAO (2013) Annotated bibliography on ecological intensification. Report of the Liberation EU Collaborative funded project (LInking farmland Biodiversity to Ecosystem seRvices for effec- tive ecofunctional intensification)
Farmer B (1986) Perspectives on the 'Green Revolution'in South Asia. Mod Asian Stud 20 (1):175–199
Fischer J, Manning AD, Steffen W, Rose DB, Daniell K, Felton A, Garnett S, Gilna B, Heinsohn R, Lindenmayer DB (2007) Mind the sustainability gap. Trends Ecol Evol 22:621–624

Folke C, Hahn T, Olsson P, Norberg J (2005) Adaptive governance of social-ecological systems. Annu Rev Environ Resour 30:441–473

Foley JA, Ramankutty N, Brauman KA, Cassidy ES, Gerber JS, Johnston M, Mueller ND, O'Connell C, Ray DK, West PC (2011) Solutions for a cultivated planet. Nature 478:337–342

Franklin S (1995) Science as culture, cultures of science. Annu Rev Anthropol 24:163–184

Fuglie KO (2010) Total factor productivity in the global agricultural economy: evidence from FAO data. In: The shifting patterns of agricultural production and productivity worldwide. Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center, Ames, pp 63–95

Funtowicz SO, Ravetz JR (1995) Science for the post normal age. In: Perspectives on ecologicalintegrity. Springer, Dordrecht

Garnett T, Appleby MC, Balmford A, Bateman IJ, Benton TG, Bloomer P, Burlingame B, Dawkins M, Dolan L, Fraser D (2013) Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. Science 341:33–34

Garnett T, Godfray C (2012) Sustainable intensification in agriculture. Navigating a course through competing food system priorities. In: Food climate research network and the Oxford Martin programme on the future of food, vol 51. University of Oxford, Oxford

Geels FW (2011) The multi-level perspective on sustainability transitions: responses to seven criticisms. Environ Innov Soc Trans 1:24–40

Gibson-Graham J (2014) Rethinking the economy with thick description and weak theory. Curr Anthropol 55:S147–S153

Gliessman SR (2014) Agroecology: the ecology of sustainable food systems. CRC press, Bosa Roca

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224

Godfray HCJ, Garnett T (2014) Food security and sustainable intensification. Philos Trans R Soc B 369:20120273

Grassini P, Eskridge KM, Cassman KG (2013) Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. Nat Commun 4:2918

Gunderson LH (2001) Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. Island Press, Washington, DC

Gunderson R (2014) Problems with the defetishization thesis: ethical consumerism, alternative food systems, and commodity fetishism. Agric Hum Values 31:109–117

Gurian-Sherman D (2009) Failure to yield: evaluating the performance of genetically engineered crops, Union of Concerned Scientists. UCS Publications, Cambridge, MA

H2020-SCC-2016-2017 (smart and sustainable cities), Topic: SCC-02-2016-2017, Proposal number: 776528-1, Proposal acronym: proGIreg

Haenen I (2017) Small successes and big failures: lessons from the aquaponics facility at Uit Je Eigen Stad (UJES). 'Aquaponics.biz': A COST FA1305 Conference on Aquaponics SMEs, Rotterdam

Hall A, Bockett G, Taylor S, Sivamohan M, Clark N (2001) Why research partnerships really matter: innovation theory, institutional arrangements and implications for developing new technology for the poor. World Dev 29:783–797

Hamilton C (2013) Earthmasters: the dawn of the age of climate engineering. Yale University Press, New Haven

Hamilton C, Gemenne F, Bonneuil C (2015) The anthropocene and the global environmental crisis: rethinking modernity in a new epoch. Routledge, Oxon

Haraway D (2015) Anthropocene, capitalocene, plantationocene, chthulucene: making kin. EnvironHumanit 6:159–165

Haraway DJ (1997) Modest-Witness@Second-Millennium.FemaleMan-Meets-OncoMouse : fem- inism and technoscience. Routledge, New York/London

Harding S (2004) Introduction: standpoint theory as a site of political, philosophic, and scientific debate. Routledge, New York

Harvey D (2007) A brief history of neoliberalism. Oxford University Press, New York

Healey P (2006) Urban complexity and spatial strategies: towards a relational planning for our times. Routledge, New York

Hinrichs CC (2003) The practice and politics of food system localization. J Rural Stud 19:33–45

Horkheimer M, Adorno TW (2002) Dialectic of enlightenment. Stanford University Press, Palo Alto

Hornborg A (2013) Technology as fetish: Marx, Latour, and the cultural foundations of capitalism. Theory Cult Soc 31:119–140

Hultman M (2013) The making of an environmental hero: a history of ecomodern masculinity, fuel cells and Arnold Schwarzenegger. Environ Humanit 2:79–99

Hunter MC, Smith RG, Schipanski ME, Atwood LW, Mortensen DA (2017) Agriculture in 2050: recalibrating targets for sustainable intensification. Bioscience 67:386–391

Jackson L, van Noordwijk M, Bengtsson J, Foster W, Lipper L, Pulleman M, Said M, Snaddon J, Vodouhe R (2010) Biodiversity and agricultural sustainagility: from assessment to adaptive management. Curr Opin Environ Sustain 2:80–87

Jahn T (2013) Sustainability science requires a critical orientation. GAIA 22:29–33

Jasanoff S (2007) Technologies of humility. Nature 450:33

Joly A, Junge R, Bardocz T (2015) Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions. Ecocycles 1:3–5

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182
Kearney J (2010) Food consumption trends and drivers. Philos. Trans. R. Soc., B 365:2793–2807
Keil R (2007) Sustaining modernity, modernizing nature. In: The sustainable development paradox: urban political ecology in the US and Europe. Guilford Press, New York, pp 41–65
Kiers ET, Leakey RR, Izac A-M, Heinemann JA, Rosenthal E, Nathan D, Jiggins J (2008) Agriculture at a crossroads. Science 320:320–321
Kloppenburg J (1991) Social theory and the de/reconstruction of agricultural science: local knowl- edge for an alternative agriculture. Rural Sociol 56:519–548
Kläy A, Zimmermann AB, Schneider F (2015) Rethinking science for sustainable development: reflexive interaction for a paradigm transformation. Futures 65:72–85
Kőmíves T, Ranka J (2015) On the aquaponic corner section of our journal. Ecocycles 1:1–2
König B, Janker J, Reinhardt T, Villarroel M, Junge R (2018) Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. J Clean Prod 180:232–243
Konig B, Junge R, Bittsanszky A, Villarroel M, Komives T (2016) On the sustainability of aquaponics. Ecocycles 2:26–32
Krueger R, Gibbs D (2007) The sustainable development paradox: urban political economy in the United States and Europe. Guilford Press, New York
Kuyper TW, Struik PC (2014) Epilogue: global food security, rhetoric, and the sustainable intensification debate. Curr Opin Environ Sustain 8:71–79
Laidlaw J, Magee L (2016) Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne. Local Environ 21:573–590
Leach M, Rockström J, Raskin P, Scoones I, Stirling A, Smith A, Thompson J, Millstone E, Ely A, Arond E (2012) Transforming innovation for sustainability. Ecol Soc 17
Latour B (1986) Visualization and cognition. In: Knowledge and society, vol 6. Open University Press, Milton Keynes, pp 1–40
Latour B (1987) Science in action: how to follow scientists and engineers through society. Harvard University Press, Cambridge, MA
Latour B (1993) We have never been modern. Harvester Wheatsheaf, New York/London
Latour B (1996) Aramis, or, the love of technology. Harvard University Press, Cambridge, MA Latour B (2004) Why has critique run out of steam? From matters of fact to matters of concern. Crit Inq 30:225–248
Latour B (2015) Telling friends from foes in the time of the Anthropocene. In: Hamilton C, Bonneuil C, Gemenne F (eds) The Anthropocene and the

global environmental crisis: rethinking modernity in a new epoch. Routledge, Abingdon/Oxon
Latour B, Woolgar S (1986[1979]) Laboratory life: the construction of scientific facts. Princeton University Press, Princeton
Lave R, Mirowski P, Randalls S (2010) Introduction: STS and neoliberal science, vol 32. Sage, London, p 463
Law J, Williams RJ (1982) Putting facts together: a study of scientific persuasion. Soc Stud Sci 12:535–558
Lawrence RJ (2015) Advances in transdisciplinarity: epistemologies, methodologies and processes. Futures 65:1–9
Lawrence G, Richards C, Lyons K (2013) Food security in Australia in an era of neoliberalism, productivism and climate change. J Rural Stud 29:30–39
Leonard L (2013) Ecomodern discourse and localized narratives: waste policy, community mobi- lization and governmentality in Ireland. In: Organising waste in the City: international perspec- tives on narratives and practices. Policy Press, Chicago, pp 181–200
Lilley S, Papadopoulos D (2014) Material returns: cultures of valuation, biofinancialisation and the autonomy of politics. Sociology 48:972–988
Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) Climate trends and global crop production since 1980. Science 333:616–620
Loos J, Abson DJ, Chappell MJ, Hanspach J, Mikulcak F, Tichit M, Fischer J (2014) Putting meaning back into "sustainable intensification". Front Ecol Environ 12:356–361
Lorimer J (2017) The Anthropo-scene: a guide for the perplexed. Soc Stud Sci 47:117–142
Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74
Lundqvist J, de Fraiture C, Molden D (2008) Saving water: from field to fork: curbing losses and wastage in the food chain. Stockholm International Water Institute, Stockholm
LAWRENCE, R. J. 2015. Advances in transdisciplinarity: Epistemologies, methodologies and processes.Futures, 65, 1-9
Marcuse H (2013) One-dimensional man: studies in the ideology of advanced industrial society. Routledge, London
Martinez-Torres ME, Rosset PM (2010) La Vía Campesina: the birth and evolution of a transnational social movement. J Peasant Stud 37:149–175
Marzec RP (2014) Neoliberalism, Environmentality, and the specter of Sajinda khan. In: Di Leo JR,
Mehan U (eds) Capital at the Brink: overcoming the destructive legacies of neoliberalism. Open Humanities Press, London
Mcmichael P (1994) The global restructuring of agro-food systems. Cornell University Press, Ithaca
Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WW (1972) The limits to

growth, vol 102. Universe Books, New York, p 27
Merchant C (1981) The death of nature: women, ecology, and scientific revolution. HarperOne, San Francisco
Miličić V, Thorarinsdottir R, Santos MD, Hančič MT (2017) Commercial aquaponics approaching the european market: to consumers' perceptions of aquaponics products in europe. Water 9:80
Miller TR, Neff MW (2013) De-facto science policy in the making: how scientists shape science policy and why it matters (or, why STS and STP scholars should socialize). Minerva 51:295–315
Miller TR, Wiek A, Sarewitz D, Robinson J, Olsson L, Kriebel D, Loorbach D (2014) The future of sustainability science: a solutions-oriented research agenda. Sustain Sci 9:239–246
Moore JW (2015) Capitalism in the web of life: ecology and the accumulation of capital. Verso Books, New York
Nally D (2011) The biopolitics of food provisioning. Trans Inst Br Geogr 36:37–53
Noordwijk V (2014) Climate change: agricultural mitigation. In: van Alfen NK (ed) Encyclopedia of agriculture and food systems. Elsevier, San Diego
Norton BG (2005) Sustainability: a philosophy of adaptive ecosystem management. University of Chicago Press, Chicago
Nugent RA (1999) Measuring the sustainability of urban agriculture. For hunger-proof cities. Sustainable urban food systems. IDRC, Ottawa, pp 95–99
Oldfield F, Richardson K, Schellnhuber H, Turner B II, Wasson R, Planet A (2004) Global change and the earth system. Springer, New York
Parfitt J, Barthel M, Macnaughton S (2010) Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. Philosophical Transactions of the Royal Society B 365:3065–3081
Pearson CJ (2007) Regenerative, semiclosed systems: a priority for twenty-first-century agriculture. Bioscience 57:409
Pearson LJ, Pearson L, Pearson CJ (2010) Sustainable urban agriculture: stocktake and opportuni- ties. Int J Agric Sustain 8:7–19
Pelletier N, Tyedmers P (2010) Forecasting potential global environmental costs of livestock production 2000–2050. Proc Natl Acad Sci 107:18371–18374
Perrot N, Trelea I-C, Baudrit C, Trystram G, Bourgine P (2011) Modelling and analysis of complex food systems: state of the art and new trends. Trends Food Sci Technol 22:304–314
Petersen B, Snapp S (2015) What is sustainable intensification? Views from experts. Land Use Policy 46:1–10
Pickering A (1992) Science as practice and culture. University of Chicago Press, Chicago
Postel SL (2003) Securing water for people, crops, and ecosystems: new mindset and new priorities. Nat Res Forum:89–98. Wiley Online Library

Potter C (2004) Multifunctionality as an agricultural and rural policy concept. Sustaining agricul- ture and the rural environment: governance, policy and multifunctionality. Edward Elgar, Northampton, pp 15–35
Power EM (1999) Combining social justice and sustainability for food security. In: For hungerproof cities: sustainable urban food systems. International Development Research Centre, Ottawa, pp 30–37
Prado JR, Segers G, Voelker T, Carson D, Dobert R, Phillips J, Cook K, Cornejo C, Monken J, Grapes L (2014) Genetically engineered crops: from idea to product. Annu Rev Plant Biol 65:769
Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics—integrating fish and plant culture. SRAC Publication 454:1–16
Reynolds HL, Smith AA, Farmer JR (2014) Think globally, research locally: paradigms and place in agroecological research. Am J Bot 101:1631–1639
Robles AG (2015) Introducing ENoLL and its living lab community. European Network of Living Labs, Brussels
Rockstrom J, Steffen W, Noone K, Persson A, Chapin FS, Lambin E, Lenton TM, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber HJ, Nykvist B, De Wit CA, Hughes T, van der Leeuw S, Rodhe H, Sorlin S, Snyder PK, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell RW, Fabry VJ, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J (2009) Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecol Soc 14:32
Rockström J, Williams J, Daily G, Noble A, Matthews N, Gordon L, Wetterstrand H, Declerck F, Shah M, Steduto P, De Fraiture C, Hatibu N, Unver O, Bird J, Sibanda L, Smith J (2017) Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. Ambio 46:4–17
Röling N (2009) Pathways for impact: scientists' different perspectives on agricultural innovation. Int J Agric Sustain 7:83–94
Rose N (2009) The politics of life itself: biomedicine, power, and subjectivity in the twenty-first century. Princeton University Press, Princeton
Savransky M (2013) An ecology of times: modern knowledge, non-modern temporalities. In: Movements in time: revolution, social justice and times of change, vol 265. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne
Schmautz Z, Graber A, Jaenicke S, Goesmann A, Junge R, Smits TH (2017) Microbial diversity in different compartments of an aquaponics system. Arch Microbiol 199:613–620
Scott JC (2008) Weapons of the weak: everyday forms of peasant resistance. Yale University Press, New Haven
Schoenbach K (2001) Myths of media and audiences: inaugural lecture as professor of general communication science, University of Amsterdam. Eur J Commun 16:361–376
Sen A (2001) Development as freedom. Oxford Paperbacks, Oxford
Smil V (2011) Harvesting the biosphere: the human impact. Popul Dev Rev

37:613–636
Smith A, Stirling A (2007) Moving outside or inside? Objectification and reflexivity in the governance of socio-technical systems. J Environ Policy Plan 9:351–373
Soini K, Birkeland I. (2014) Exploring the scientific discourse on cultural sustainability. Geoforum 51:213–223
Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C (2015a) The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. Anthropocene Rev 2:81–98
Steffen W, Richardson K, Rockström J, Cornell SE, Fetzer I, Bennett EM, Biggs R, Carpenter SR, De Vries W, De Wit CA (2015b) Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science 347:1259855
Steffen W, Sanderson RA, Tyson PD, Jäger J, Matson PA, Moore B III, Oldfield F, Richardson K, Schellnhuber HJ, Turner BL (2006) Global change and the earth system: a planet under pressure. Springer, New York
Stengers I (2015) In catastrophic times: resisting the coming barbarism. Open Humanities Press, London
Stengers I (2018) Another science is possible: a manifesto for slow science. Polity Press, Cambridge
Stern N (2008) The economics of climate change. Am Econ Rev 98:1–37
Stocker T (2014) Climate change 2013: the physical science basis: working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge
Struik P (2006) Trends in agricultural science with special reference to research and development in the potato sector. Potato Res 49:5
Struik P, Kuyper T, Brussaard L, Leeuwis C (2014) Deconstructing and unpacking scientific controversies in intensification and sustainability: why the tensions in concepts and values? Curr Opin Environ Sustain 8:80–88
Struik PC, Kuyper TW (2014) Editorial overview: sustainable intensification to feed the world: concepts, technologies and trade-offs. Curr Opin Environ Sustain 8:vi–viii
Stuart T (2009) Waste: uncovering the global food scandal. WW Norton & Company, New York
Tegtmeier EM, Duffy MD (2004) External costs of agricultural production in the United States. Int J Agric Sustain 2:1–20
Thrift N (1999) Steps to an ecology of place. Human geography today. Polity Press, Cambridge, pp 295–322
Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort BL (2011) Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proc Natl Acad Sci 108:20260–20264
Tittonell P, Giller KE (2013) When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. Field Crop Res 143:76–90

van der Ploeg JD, Ventura F (2014) Heterogeneity reconsidered. Curr Opin Environ Sustain 8:23–28
Vermeulen SJ, Campbell BM, Ingram JS (2012) Climate change and food systems. Annu Rev Environ Resour 37:195
Villarroel M, Junge R, Komives T, König B, Plaza I, Bittsánszky A, Joly A (2016) Survey of aquaponics in europe. Water 8:468
Wall D (2007) Realist utopias? Green alternatives to capitalism. Environ Politics 16:518–522
Weber KM, Rohracher H (2012) Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive 'failures' framework. Res Policy 41:1037–1047
Weis T (2010) The accelerating biophysical contradictions of industrial capitalist agriculture. J Agrar Chang 10:315–341
Wiek A, Ness B, Schweizer-Ries P, Brand FS, Farioli F (2012) From complex systems analysis to transformational change: a comparative appraisal of sustainability science projects. Sustain Sci 7:5–24
Williams JW, Jackson ST (2007) Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. Front Ecol Environ 5:475–482
Wilson GA (2001) From productivism to post-productivism... and back again? Exploring the (un) changed natural and mental landscapes of European agriculture. Trans Inst Br Geogr 26:77–102
Winner L (1986) The whale and the reactor: a search for limits in an age of high technology. University of Chicago Press, Chicago
Withers CW (2009) Place and the "Spatial Turn" in geography and in history. J Hist Ideas 70:637–658
Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, Crutzen P (2010) The new world of the Anthropocene. Environ Sci Technol 44:2228–2231.

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 17

CONOCIMIENTO DE LOS RIESGOS EN LA SALUD DE LOS ANIMALES ACUÁTICOS EN ACUAPONÍA

Hijran Yavuzcan Yildiz, Vladimir Radosavljevic, Giuliana Parisi, and Aleksandar Cvetkovikj

Capítulo 17

CONOCIMIENTO DE LOS RIESGOS EN LA SALUD DE LOS ANIMALES ACUÁTICOS EN ACUAPONÍA

Hijran Yavuzcan Yildiz, Vladimir Radosavljevic, Giuliana Parisi, and Aleksandar Cvetkovikj

Resumen

El interés del público en la acuaponía surge de la necesidad de controlar la salud de los peces para minimizar el riesgo de la presencia de enfermedades infecciosas y no infecciosas que resultan del inadecuado manejo de los animales, siendo este un problema representado en pérdidas de peces, la cual puede llegar afectar la salud humana y con ello disminuir las ventas reflejadas en perdidas económicas en la industria acuapónica. La complejidad de los sistemas acuapónicos es limitado uso de antiparasitarios/antimicrobianos o desinfectantes para erradicar enfermedades o parásitos. En este capitulo, proporcionamos una visión general de los peligros potenciales en términos de riesgos relacionados con la salud de los animales acuáticos y describimos enfoques preventivos específicos para los sistemas Acuapónicos.

Palabras clave: Acuaponía; Salud de los peces; Bioseguridad; Estrategias de tratamiento.

H. Yavuzcan Yildiz (*)
Department of Fisheries and Aquaculture, Ankara University, Ankara, Turkey
e-mail: yavuzcan@ankara.edu.tr
V. Radosavljevic
Department of Fish Diseases, National Reference Laboratory for Fish Diseases, Institute of Veterinary Medicine of Serbia, Belgrade, Serbia
e-mail: vladimiradosavljevic@yahoo.co.uk
G. Parisi
Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), Animal Science Section, University of Florence, Florence, Italy
e-mail: giuliana.parisi@unifi.it
A. Cvetkovikj
Department of Parasitology and Parasitic diseases, Faculty of Veterinary Medicine, Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Skopje, Republic of Macedonia Department of Fisheries, Institute of Animal Science, Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Skopje, Republic of Macedonia
e-mail: acvetkovic@fvm.ukim.edu.mk; acvetkovikj@gmail.com

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_17

17.1 INTRODUCCIÓN

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria informó sobre una variedad de factores impulsores y posibles problemas asociados con las nuevas tendencias en la producción de alimentos, y la acuaponía se identificó como una nueva práctica de producción de alimentos (Afonso et al, 2017). Como un nuevo proceso de producción de alimentos, la acuaponía se puede definir como "la combinación de la acuicultura animal y el cultivo de plantas, a través de un enlace microbiano y en una relación simbiótica". En acuaponía, el enfoque básico es obtener beneficios de las funciones complementarias de los organismos y la recuperación de nutrientes. La parte de acuicultura del sistema aplica principios similares a los sistemas de recirculación de acuicultura (RAS). La acuaponía ha ganado impulso debido a sus características superiores en comparación con los sistemas de producción tradicionales. Por lo tanto, la acuaponía es capaz de mantener los ecosistemas y fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático, clima extremo, sequía, inundaciones y otros desastres. Estos atributos están al alcance, pero como en otras producciones agrícolas / acuícolas, la acuaponía no está exenta de riesgos. Dada la complejidad de la acuaponía como ambiente para la coproducción de animales acuáticos con plantas, los peligros y riesgos pueden ser más complicados.

El enfoque en este capítulo está en categorías de riesgo (es decir, salud / enfermedad animal) en lugar de riesgos específicos (por ejemplo, enfermedad por flectobacilosis). En la acuicultura tradicional, algunos de los tipos más comunes de riesgos de producción son las enfermedades causadas por agentes patógenos, la calidad inadecuada del agua y la falla del sistema. Snieszko (1974) informó que las enfermedades infecciosas de los peces ocurren cuando los peces susceptibles están expuestos a patógenos virulentos bajo ciertas condiciones ambientales. Por lo tanto, la interacción de los patógenos, la calidad del agua y la resistencia de los peces está relacionada con la aparición de enfermedades. Investigaciones previas

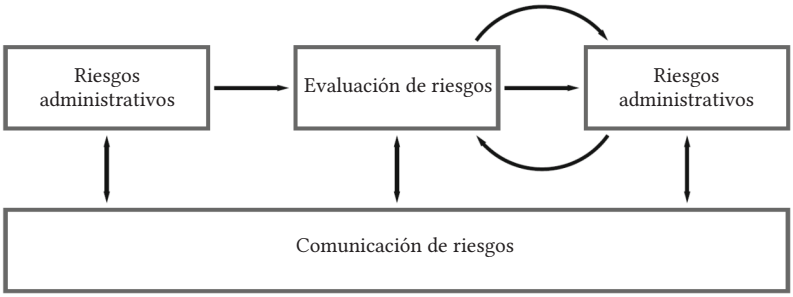


Fig. 17.1 Risk analysis (OIE 2017)

utilizando métodos de riesgo han estudiado las rutas de introducción de patógenos de animales acuáticos para asegurar el comercio seguro (por ejemplo, análisis de riesgo de importación) y apoyar la bioseguridad (Peeler y Taylor 2011). Teniendo en cuenta la similitud de la acuaponia con el RAS, se espera que los problemas de salud de los animales acuáticos en acuaponia puedan ser idénticos a los animales acuáticos en el RAS. Específicamente, las fluctuaciones en la calidad del agua pueden aumentar la susceptibilidad de los peces a los patógenos (es decir, organismos que causan enfermedades como virus, bacterias, parásitos, hongos) en RAS y causar brotes de enfermedades. Los microorganismos en sistemas cerrados como RAS o acuaponia son importantes en términos de mantenimiento de la salud de los peces. Por lo tanto, Xue et al. (2017) informaron la posible correlación entre enfermedades de peces y poblaciones bacterianas ambientales en RAS. La alta densidad de patógenos y las posibilidades limitadas de medicamentos hacen que el sistema sea propenso a problemas de enfermedades. La enfermedad o el deterioro de la salud pueden causar pérdidas catastróficas con una disminución de la supervivencia o una pobre relación de conversión alimenticia. Independientemente de qué riesgo potencial se vuelva problemático, cada uno tiene el mismo impacto: una disminución general en la producción de un producto comercializable de calidad que luego resulta en una pérdida financiera (McIntosh 2008). Las enfermedades solo se pueden prevenir cuando los riesgos se reconocen y se manejan antes de que ocurra (Nowak 2004). La gravedad de los riesgos difiere y probablemente cambiará dependiendo de cuándo se encuentre cada uno durante el ciclo de producción.

17.2 ACUAPONÍA Y RIESGO: UNA PERSPECTIVA DESARROLLO PARA LA SALUD DE LOS PECES

Los patógenos de los peces son frecuentes en el medio ambiente acuático, y los peces generalmente pueden resistirlos a menos que estén sobrecargados por la carga alostática (Yavuzcan Yıldız y Seçer 2017) La alostasis se refiere a la "estabilidad a través del cambio" propuesta por Sterling y Eyer (1988). En pocas palabras, este es el esfuerzo de los peces para mantener la homeostasis a través de cambios en la fisiología. La carga alostática de peces en acuaponía puede ser un factor desafiante ya que la acuaponía es un sistema complejo principalmente en términos de la calidad del agua y la comunidad microbiana en el sistema. Por lo tanto, las enfermedades de los peces son generalmente específicas de las especies y del sistema. Aún no se han descrito enfermedades acuapónicas específicas. De la acuicultura, se sabe que las enfermedades de los peces son difíciles de detectar y generalmente son el resultado final de la interacción entre varios factores que involucran el medio ambiente, el estado nutricional de los peces, la

robustez inmune de los peces, la existencia de un agente infeccioso y / o malas prácticas de manejo. Para mantener los sistemas de acuaponía, se debe desarrollar un enfoque de gestión de la salud acuática teniendo en cuenta las especies cultivadas, la complejidad de los entornos en acuaponía y el tipo de gestión del sistema. La rentabilidad en la producción de acuaponía puede verse afectada incluso por pequeñas reducciones porcentuales en la producción, como se observa en la acuicultura (Subasinghe 2005).

La acuaponía es un enfoque sostenible e innovador para los futuros sistemas de producción de alimentos, pero este sistema integrado para la producción actualmente muestra dificultades para pasar de la etapa experimental o los módulos a pequeña escala a la producción a gran escala. Se podría plantear la hipótesis de que la falta del éxito económico de este sistema de producción altamente sostenible se debe a importantes cuellos de botella que aún no se han abordado científicamente. Sin lugar a dudas, la rentabilidad y las capacidades técnicas de los sistemas de acuaponía necesitan más investigación para lograr un aumento de la producción (Junge et al. 2017). La actividad de investigación y las innovaciones aplicadas desde la década de 1980 han transformado la tecnología de acuaponía en un sistema viable de producción de alimentos, y aunque las plantas a pequeña escala y las plantas estructuradas para la investigación ya son viables, la acuaponía a escala comercial no suele ser económicamente viable. Las ventajas reivindicadas atribuidas y reconocidas para los sistemas de acuaponía son las siguientes: reducción significativa en el uso de agua (en comparación con los métodos tradicionales de cultivo de plantas en el suelo), verduras más grandes y saludables que cuando se cultivan en el suelo, la producción de plantas no requiere fertilizantes y productos acuaponicos no contienen antibióticos, pesticidas ni herbicidas.

17.2.1 Resumen del análisis de riesgos

El riesgo se define como 'incertidumbre y gravedad de las consecuencias de una actividad' (Aven 2016), y la imagen del riesgo refleja (i) probabilidades / factores que podrían crear grandes desviaciones entre los resultados esperados y los resultados reales (incertidumbres, vulnerabilidades). El análisis de riesgos ofrece herramientas para juzgar el riesgo y ayudar en la toma de decisiones (Ahl et al. 1993; MacDiarmid 1997). El análisis de riesgos se basa en el uso sistemático de la información disponible para la toma de decisiones, utilizando los componentes de identificación de peligros, evaluación de riesgos, gestión de riesgos y comunicación de riesgos según lo indicado por la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) (Fig. 17.1). Este marco se usa comúnmente para el análisis de riesgo de patógenos (Peeler et al. 2007).

El análisis de riesgos en la producción de alimentos, incluida la acuaponía, se puede aplicar a muchos casos como la seguridad alimentaria, las especies invasoras, la rentabilidad de la producción, el comercio y la inversión, y la preferencia del consumidor por productos seguros y de alta calidad (Bondad-Reantaso et al. 2005; Copp et al. 2016). Los beneficios de aplicar el análisis de riesgos en la acuicultura se vincularon claramente con la sostenibilidad, rentabilidad y eficiencia de este sector, y este enfoque también puede ser efectivo para el sector de la acuaponía. Por lo tanto, la introducción de enfermedades y la posible transmisión de patógenos se pueden evaluar en el contexto de riesgo para la salud de los animales acuáticos (Peeler et al. 2007). Varios acuerdos, convenciones y protocolos internacionales cubren la salud humana, animal y vegetal, la acuicultura, las pesquerías silvestres y el medio ambiente en general en el campo del riesgo. Los acuerdos y protocolos más completos y amplios son el Acuerdo Sanitario y Fitosanitario de la Organización Mundial del Comercio (OMC), el Convenio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) sobre Diversidad Biológica y el acuerdo complementario del Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología y el Codex Alimentarius (Mackenzie et al. 2003 ; Rivera-Torres 2003).

Un desafío clave con respecto al campo de riesgo se relaciona con nuestra profundidad de conocimiento. Las decisiones de riesgo son situaciones relacionadas caracterizadas por grandes incertidumbres (Aven 2016). Específicamente, el análisis de riesgos para la salud animal depende del conocimiento obtenido de los estudios de epidemiología y estadística. Oidtmann y col. (2013) señalan que la principal limitación para desarrollar diseños de vigilancia basada en riesgos (RBS) en el contexto acuático es la falta de datos publicados para avanzar en el diseño de RBS. Por lo tanto, para aumentar robusto conocimiento de los riesgos en acuaponía, se necesitan estudios que aumenten los datos científicos y reduzcan las debilidades específicas y los campos inciertos en las operaciones de acuaponía. A continuación se presentan algunas áreas de investigación que requieren más datos para el análisis de riesgos en los sistemas de acuaponía (Tabla 17.1).

En términos de análisis de riesgo para enfermedades de animales acuáticos o salud en acuaponía sistemas, el Código de Salud de Animales Acuáticos de la OIE (el Código Acuático) puede considerarse porque el Código Acuático establece estándares para la mejora de la salud y el bienestar de los animales acuáticos en todo el mundo y para el comercio internacional seguro de animales acuáticos y sus productos. Este Código también incluye el uso de agentes antimicrobianos en animales acuáticos (OIE 2017).

Tabla 17.1 Necesidades de investigación compuesta para la salud de los animales acuáticos en acuaponía

Area de Investigacion	Necesidades en Investigacion
Investigacion Basica	Comprender el concepto de salud y bienestar de los animales acuáticos en acuaponía en términos de las especies de organismos acuáticos y el sistema used
	Comprender el concepto de estrés / estresor para organismos acuáticos en acuaponia por las especies y el sistema utilizado.
	Comprender la carga alostática de los organismos acuáticos y la aparición de enfermedades.
	Comprender el concepto de bienestar en acuaponía
	Caracterizar los parámetros críticos de calidad del agua contra la salud de los animales acuáticos.
	Comprender la sensibilidad de los organismos acuáticos al medio acuático.
	Revelando el perfil microbiano para los diferentes sistemas de la aquaponics
Indicadores de salud	Desarrollo y validación de indicadores de salud para animales acuáticos criados en los sistemas acuaponicos.
Desarrollo de bases de datos.	Datos de campo sobre la salud / enfermedad de los animales acuáticos en acuaponía
	Datos de campo sobre el perfil microbiano, incluidos los patógenos.

17.3 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

En el análisis de riesgos, un peligro generalmente se especifica describiendo qué podría salir mal y cómo podría suceder esto (Ahl et al. 1993). Un peligro se refiere no solo a la magnitud de un efecto adverso sino también a la probabilidad de que ocurra el efecto adverso (Müller-Graf et al. 2012).

La identificación de peligros es importante para revelar los factores que pueden favorecer el establecimiento de una enfermedad y / o amenaza potencial de patógenos, o que de otro modo perjudique el bienestar de los peces. Bondad-Reantaso et al. (2008). Reconocen que los patógenos biológicos son peligrosos en la acuicultura. Se puede tener en cuenta una amplia gama de factores siempre que estén asociados con la aparición de enfermedades, es decir, que sean peligros.

La sostenibilidad de la acuaponía está relacionada con una variedad de factores, que incluyen el diseño del sistema, las características de alimentación de peces y heces, el bienestar de los peces y la eliminación de patógenos del sistema (Palm et al. 2014a, b). Goddek (2016) informó que los sistemas de acuaponía se caracterizan por una amplia gama de microfloras ya que existen peces y biofiltración en la misma masa de agua. Dado que

Tabla 17.2 Lista de peligros potenciales para la salud de los animales acuáticos en acuaponia.

	Identificacion del Riesgo	**Especificacion del Riesgo**
Abioticos	pH	Demasiado alto / demasiado bajo / cambio rápido
	Temperatura del Agua	Demasiado alta / demasiado baja / cambio rápido
	Solidos Suspendedidos	Demasiado Alto
	Contenido de oxígeno disuelto	Demasiado Bajo
	Contenido de Dioxido de Carbono	Demasiado Alto
	Contenido de Amoniaco	Demasiado alto, dependiente del pH
	Contentido de Nitrito	Demasiado Alto
	Contenido de Nitrato	Extremadamente Alto
	Contentenido de Metales	Demasiado alto, dependiente del pH
Bioticos	Densidad/ capacidad de carga	Demasiado alta / demasiado baja
	Bioincrustacion	
Alimentacion	Nutrientes por especies de peces	Excedente / deficiencia
	Frecuencia de alimentacion	Alimentacion Inadecuada/ Incorrecta
	Toxinas en la Dieta	
	Aditivos en el Alimento	Promotores de crecimiento inadecuados
Administracion	Diseño del Sistema Acuaponico	deficiente Diseño del Sistema
	Especies de Peces	Inadecuados para acuaponía
	Operational issues (water circulation, biofilter, mechanical)	
	Uso de quimioterapeutas	Amenaza para el equilibrio microbiano.
	Higiene del Personal	
	Bioseguridad	
Bienestar	Stressores	Demasiado Alto
	Carga Alostatica	Alta
	Condiciones de cría	Suboptimo
Enfermedades	Enfermedades Nutricionales	
	Enfermedades Ambientales	
	Enfermedades Infecciosas	

existe una gran variedad de microfloras en las prácticas de acuaponía, la presencia de patógenos y riesgos para la salud humana también debe considerarse para garantizar la seguridad alimentaria. En términos de sostenibilidad de acuaponía En los sistemas, la eliminación de patógenos para evitar pérdidas debido a enfermedades puede ser un factor desafiante cuando se intensifica la producción de animales acuáticos.

El uso de quimioterapeutas en la acuicultura para combatir los patógenos presenta una serie de posibles peligros y riesgos para los sistemas de producción, el medio ambiente y la salud humana (Bondad-Reantaso y Subasinghe 2008) (Tabla 17.2).Para eliminar los peligros, las fases de cría de peces y cultivo de plantas deben considerarse por separado. Los mayores riesgos en la cría de peces están relacionados con la calidad del agua, la densidad del pescado, la calidad y cantidad de alimentación y la enfermedad (Yavuzcan Yildiz et al. 2017). Dependiendo de la especie de peces

criados, el nivel de riesgo puede aumentar si la especie no es apropiada para las condiciones del sistema en particular. Por ejemplo, el potasio a menudo se complementa en sistemas acuaponicos para promover el crecimiento de las plantas, pero resulta en un rendimiento reducido en el bajo rayado híbrido. Normalmente, el agua dulce y las especies tolerantes al cultivo de alta densidad se utilizan en acuaponia.

Las especies de peces más comunes en los sistemas comerciales son la tilapia y los peces ornamentales como el pez gato del canal, la lubina, los crappies, la trucha arcoiris, el pacu, la carpa común, la carpa koi, el pez dorado, la lubina asiática (o barramundi) y el bacalao Murray se encuentran entre las especies que se han probado (Rakocy et al. 2006). La tilapia, una especie de agua cálida, altamente tolerante a los parámetros fluctuantes del agua (pH, temperatura, oxígeno y sólidos disueltos), es la especie criada en gran medida en la mayoría de los sistemas de acuaponia comerciales en América del Norte y otros lugares. Los resultados de una encuesta en línea reciente, basada en las respuestas de 257 encuestados, mostraron que la tilapia se cría en el 69% de las plantas acuaponicas (Love et al. 2015). La tilapia presenta un interés económico en algunos mercados pero no en otros. En la misma encuesta (Love et al.2015), otras especies utilizadas fueron peces ornamentales (43%), peces gato (25%), otros animales acuáticos (18%), percas (16%), branquias azules (15%), truchas (10%) y bajo (7%). Una de las principales debilidades en los sistemas de acuaponia es el manejo de la calidad del agua para cumplir con los requisitos de los peces criados en tanques, mientras que los cultivos se tratan como el segundo paso del proceso. Los peces requieren agua con parámetros apropiados de oxígeno, dióxido de carbono, amoníaco, nitrato, nitrito, pH, cloro y otros. Un alto nivel de sólidos en suspensión puede afectar el estado de salud de los peces (Yavuzcan Yildiz et al.2017), provocando daños en la estructura branquial, como el levantamiento del epitelio, la hiperplasia en el sistema de pilares y la reducción del volumen epitelial (Au et al. 2004). La densidad y la alimentación de la población de peces (tasa y volumen de alimentación, composición y características del alimento) afectan los procesos de digestión y las actividades metabólicas de los peces y, en consecuencia, los catabolitos, los sólidos disueltos totales (TDS) y los subproductos de desecho (heces y alimentos no consumidos) en la cría de agua.

El principio básico en el que se basa el sistema acuaponico es la utilización de catabolitos en el agua para el crecimiento de las plantas. Los sistemas acuaponicos requieren 16 nutrientes esenciales y todos estos macro y micronutrientes deben estar equilibrados para un crecimiento óptimo de la planta. Un exceso de un nutriente puede afectar negativamente la biodisponibilidad de otros (Rakocy et al. 2006). Por lo tanto, el monitoreo conti-

nuo de los parámetros del agua es esencial para mantener la calidad del agua adecuada para el crecimiento de peces y cultivos y para maximizar los beneficios del proceso. El intercambio de agua reducido y la baja tasa de crecimiento de los cultivos pueden crear concentraciones tóxicas de nutrientes en el agua para peces y cultivos. Por otro lado, la adición de algunos los micronutrientes (Fe^{+2}, Mn^{+2}, Cu^{+2}, B^{+3} y Mo^{+6}), normalmente escasos en el agua donde se crían los peces, son esenciales para mantener adecuadamente la producción de cultivos. En comparación con el cultivo hidropónico, los cultivos en sistemas acuaponicos requieren niveles más bajos de sólidos disueltos totales (TDS, 200–400 ppm) o CE (0.3–0.6 mmhos / cm) y requieren, como los peces, un alto nivel de oxígeno disuelto en el agua (Rakocy et al. 2006) para la respiración de la raíz.

17.4 GESTIÓN DE LA SALUD DE LOS PECES

17.4.1 Enfermedades y prevención de peces

Si bien las enfermedades de los peces causadas por bacterias, virus, parásitos y hongos pueden tener un impacto negativo significativo en la acuicultura (Kabata 1985), la aparición de una enfermedad en los sistemas acuaponicos puede ser aún más devastadora. El mantenimiento de la salud de los peces en los sistemas de acuaponía es más difícil que en el RAS y, de hecho, el control de las enfermedades de los peces es uno de los principales desafíos para la acuaponía exitosa (Sirakov et al.2016) Las enfermedades que afectan a los peces se pueden dividir en dos categorías: enfermedades infecciosas y no infecciosas. Las enfermedades infecciosas son causadas por diferentes patógenos microbianos transmitidos desde el medio ambiente o desde otros peces. Los patógenos se pueden transmitir entre los peces (transmisión horizontal) o verticalmente, por huevos infectados (externa o internamente) Más de la mitad de los brotes de enfermedades infecciosas en la acuicultura (54,9%) son causados por bacterias, seguidas de virus, parásitos y hongos (McLoughlin y Graham 2007). A menudo, aunque los signos clínicos o las lesiones no están presentes, los peces pueden transportar patógenos en un estado subclínico o portador (Winton 2002). Las enfermedades de los peces pueden ser causadas por bacterias ubicuas, presentes en cualquier agua que contenga enriquecimiento orgánico. Bajo ciertas condiciones, las bacterias se convierten rápidamente en patógenos oportunistas. La presencia de un bajo número de parásitos en las branquias o la piel generalmente nos conduce a problemas de salud significativos. La capacidad de un patógeno para causar enfermedad clínica depende de la interrelación de seis componentes principales relacionados con los peces y el medio ambiente en el que viven (estado fisiológico, huésped, cría, medio ambiente, nutrición y patógeno). Si

alguno de los componentes es débil, afectará el estado de salud de los peces (Plumb y Hanson 2011).

Las enfermedades no infecciosas generalmente están relacionadas con factores ambientales, nutrición inadecuada o defectos genéticos (Parker 2012). El manejo exitoso de la salud de los peces se logra mediante la prevención de enfermedades, la reducción de la incidencia de enfermedades infecciosas y la reducción de la gravedad de la enfermedad cuando ocurre. Evitar el contacto entre los peces susceptibles y un patógeno debería ser un objetivo crítico, para prevenir brotes de enfermedades infecciosas.
Tres medidas principales para lograr este objetivo son:

Uso de suministro de agua libre de patógenos.
Uso de existencias certificadas libres de patógenos.
Atención estricta al saneamiento (Winton 2002).

La implementación de estas medidas disminuirá la exposición de peces a agentes patógenos. Sin embargo, es prácticamente imposible definir todos los agentes que podrían causar enfermedades en el medio ambiente acuático y prevenir por completo la exposición del huésped a los patógenos. Ciertos factores, como el hacinamiento, aumentan la susceptibilidad de los peces a la infección y la transmisión de patógenos. Por esa razón, muchos patógenos que no causan enfermedades en los peces salvajes pueden causar brotes de enfermedades con altas tasas de mortalidad en los sistemas de producción de peces de alta densidad. Para evitar esto, el nivel de infección de los peces en acuaponía debe ser monitoreado continuamente. Mantener la bioseguridad en acuaponía es importante no solo desde un punto de vista económico sino también para el bienestar de los peces; la aparición de cualquier patógeno de peces en un tanque limitado y bajo una alta densidad de población inevitablemente representará una amenaza para la salud de los peces, tanto para los individuos afectados por el patógeno como para aquellos que aún no se han visto afectados. El objetivo de la bioseguridad es la implementación de prácticas y procedimientos que reduzcan los riesgos de:

Introducción de patógenos en la instalación.
Propagación de patógenos en toda la instalación.
Presencia de condiciones que pueden aumentar la susceptibilidad a infecciones y enfermedades.(Bebak-Williams et al. 2007).

El logro de este objetivo implica protocolos de gestión para evitar la entrada de patógenos específicos en el sistema de producción. La cuarente-

na es un componente importante de bioseguridad para prevenir el contacto con agentes infecciosos y se usa cuando los peces se mueven de un área a otra. Todos los peces recién adquiridos se ponen en cuarentena antes de ser introducidos en poblaciones establecidas. Los peces en cuarentena se aíslan durante un período de tiempo específico antes de liberarlos en contacto con una población residente, preferiblemente en un área separada con equipo dedicado (Plumb y Hanson 2011). Los peces nuevos permanecen en cuarentena hasta que se demuestre que están libres de enfermedades. En algunos casos, es aconsejable poner en cuarentena los peces nuevos en un tanque de aislamiento durante 45 días antes de agregarlos al sistema principal (Somerville et al. 2014).

Durante la cuarentena, los peces son monitoreados para detectar signos de enfermedad y se toman muestras para detectar la presencia de agentes infecciosos. Los tratamientos profilácticos pueden iniciarse durante el período de cuarentena para eliminar las cargas iniciales de parásitos externos.

Para la prevención de enfermedades, se recomiendan ciertas medidas para reducir los factores de riesgo:

- Administrar vacunas comerciales contra varios patógenos virales y bacterianos de peces. Las rutas más comunes de aplicación son por inyección, por inmersión o por comida.
- Cría de cepas de peces que son más resistentes a ciertos patógenos de peces. Aunque Evenhuis et al. (2015) informan que las cepas de peces con mayor resistencia simultánea a dos enfermedades bacterianas (columnaris y enfermedad bacteriana del agua fría) están disponibles, hay evidencia de que puede producirse una mayor susceptibilidad a otros patógenos (Das y Sahoo 2014; Henryon et al. 2005)
- Tome medidas preventivas y correctivas para prevenir el estrés en los peces. Dado que múltiples factores estresantes están presentes en cada paso de la producción de acuaponia, la prevención y el manejo del estrés a través del monitoreo y la prevención minimizan su influencia en la salud de los peces. Take preventive and corrective measures to prevent stress in fish. Since multiple stressors are present in every step of aquaponic production, avoidance and management of stress through monitoring and prevention minimize its influence on fish health.
- Evite la alta densidad de población, que causa estrés y puede aumentar la incidencia de enfermedades, incluso si otros factores ambientales son aceptables. Además, la alta densidad de población aumenta la posibilidad de lesiones cutáneas, que son sitios de diversas entradas de

patógenos en el organismo.

- Elimine regularmente los contaminantes del agua (alimentos no consumidos, heces y otras partículas orgánicas). Los peces muertos o moribundos deben retirarse rápidamente, ya que pueden servir como posibles fuentes de enfermedades para el stock restante y un caldo de cultivo para otros, así como ensuciar el agua cuando se descomponen (Sitj-à-Bobadilla y Oidtmann 2017).
- Desinfecte todos los equipos utilizados para la limpieza de tanques y la manipulación de peces. Después de una desinfección adecuada, todo el equipo debe enjuagarse con agua limpia. Se recomienda el uso de baños de pies y lavado de manos con jabón desinfectante en la entrada y dentro de los edificios. Estos pasos disminuyen directamente el potencial de propagación de patógenos (Sitjà-Bobadilla y Oidtmann 2017). Ciertos productos químicos utilizados como desinfectantes (como el cloruro de benzalconio, cloramina B y T, yodóforos) son efectivos para la prevención de enfermedades.
- Administrar aditivos dietéticos e inmunoestimulantes para mejorar la salud y reducir los impactos de la enfermedad. Dichas dietas contienen varios ingredientes importantes para mejorar la salud y la resistencia a las enfermedades (Anderson 1992; Tacchi et al. 2011). Existe una amplia gama de productos y moléculas, que incluyen productos vegetales naturales, inmunoestimulantes, vitaminas, microorganismos, ácidos orgánicos, aceites esenciales, prebióticos, probióticos, simbióticos, nucleótidos, vitaminas, etc. (Austin y Austin 2016; Koshio 2016; Martin y Król 2017).
- Separe los peces por edad y especie para la prevención de enfermedades, ya que la susceptibilidad a ciertos patógenos varía con la edad, y ciertos patógenos son específicos de algunas especies de peces. En general, los peces jóvenes son más susceptibles a los patógenos que los peces más viejos (Plumb y Hanson 2011).

Mantener la salud de los peces en acuaponía requiere un manejo adecuado de la salud y atención continua. La salud óptima de los peces se logra mejor a través de medidas de bioseguridad, tecnología de producción adecuada y prácticas de manejo de cría que permitan condiciones óptimas. Como se mencionó, evitar las condiciones óptimas de cría y los procedimientos de bioseguridad son la mejor manera de evitar las enfermedades de los peces. Invariablemente, sin embargo, puede aparecer un patógeno en el sistema. La primera y más importante acción es identificar el patógeno correctamente.

17.4.2 Diagnóstico de enfermedades (identificación de peces enfermos)

El reconocimiento temprano de los peces enfermos es importante para mantener la salud de la unidad de acuicultura en el sistema de acuaponía el diagnóstico preciso y la respuesta rápida detendrán la propagación de la enfermedad a otros peces, minimizando así las pérdidas.

El examen de los peces vivos comienza observando su comportamiento. La observación diaria constante y cuidadosa permite el reconocimiento temprano de peces enfermos. Como regla general, se deben observar los cambios de comportamiento antes, durante y después de la alimentación. Los peces sanos exhiben movimientos de natación rápidos y enérgicos y un fuerte apetito. Nadan en patrones normales específicos de especie y tienen la piel intacta sin decoloraciones (Somerville et al. 2014). Los peces enfermos exhiben varios cambios de comportamiento con o sin cambios visibles en la apariencia física. El indicador más obvio del deterioro de la salud de los peces es la reducción (cese) de la actividad alimentaria, generalmente como resultado de un estrés ambiental y / o una enfermedad infecciosa / parasitaria. El signo más evidente de la enfermedad es la presencia de animales muertos o moribundos (Parker 2012; Plumb y Hanson 2011).

Los cambios de comportamiento en los peces enfermos pueden incluir natación anormal (natación-ming cerca de la superficie, a lo largo de los lados del tanque, apiñándose en la entrada de agua, girando, girando, lanzándose, nadando boca abajo), parpadeando, rascándose en el fondo o los lados del tanque, movimiento inusualmente lento, pérdida de equilibrio, debilidad, colgando Apaciblemente debajo de la superficie, acostado en el fondo y jadeando en la superficie del agua (signo de bajo nivel de oxígeno) o sin reaccionar a estímulos externos. Además de los cambios de comportamiento, los peces enfermos muestran signos físicos que pueden verse a simple vista. Estos signos graves pueden ser externos, internos o ambos y pueden incluir la pérdida de masa corporal; abdomen distendido o hidropesía; deformación espinal; oscurecimiento o aclaramiento de la piel; aumento de la producción de moco; áreas descoloridas en el cuerpo; erosiones de la piel, úlceras o llagas; fin de daño; pérdida de escala; quistes tumores hinchazón en el cuerpo o las branquias; hemorragias, especialmente en la cabeza y el istmo, en los ojos y en la base de las aletas; y ojos saltones (ojo de estallido, exoftalmia) o endoftalmia (ojos hundidos).

Los signos internos son cambios en el tamaño, el color y la textura de los órganos o tejidos, la acumulación de fluidos en las cavidades corporales y

la presencia de formaciones patológicas como tumores, quistes, hematomas y lesiones necróticas (Noga 2010; Parker 2012; Plumb y Hanson 2011; Winton 2002).

Ante la sospecha de deterioro de la salud de los peces, el primer paso es verificar la calidad del agua (temperatura del agua, oxígeno disuelto, pH, niveles de amoníaco, nitrito y nitrato) y responder rápidamente a cualquier desviación del rango óptimo. Si la mayoría de los peces en el tanque tiene un comportamiento anormal y muestra signos no específicos de enfermedad, es probable que haya un cambio en las condiciones ambientales (Parker 2012; Somerville et al. 2014). El oxígeno bajo (hipoxia) es una causa frecuente de mortalidad de peces. Los peces en agua con poco oxígeno son letárgicos, se congregan cerca de la superficie del agua, respiran aire y tienen una pigmentación más brillante. Los peces moribundos exhiben respiración agonal, con la boca abierta y flujo ocular. Estos signos también son evidentes en los cadáveres de peces, los altos niveles de amoníaco causan hiperexcitabilidad con espasmos musculares, interrupción de la alimentación y la muerte. La desviación crónica de los niveles óptimos produce anemia y disminución del crecimiento y resistencia a las enfermedades. Los peces envenenados con nitrito tienen cambios de comportamiento característicos de la hipoxia con branquias de color marrón claro o marrón y sangre marrón (Noga 2010).

Cuando solo unos pocos peces muestran signos de enfermedad, es imperativo retirarlos de inmediato para detener y prevenir la propagación del agente de la enfermedad al otros peces en las primeras etapas de un brote de enfermedad, generalmente solo unos pocos peces mostrarán signos y morirán. En los días siguientes, habrá un aumento gradual en la tasa de mortalidad diaria. Los peces enfermos deben ser examinados cuidadosamente para determinar la causa. Solo unas pocas enfermedades de los peces producen signos conductuales y físicos patognomónicos (específicos de una enfermedad dada). Sin embargo, la observación cuidadosa a menudo permitirá que el examinador reduzca la causa a las condiciones ambientales o agentes de la enfermedad. En un brote de enfermedad grave, se debe contactar inmediatamente a un veterinario / especialista en salud de peces para obtener un diagnóstico profesional y opciones de manejo de la enfermedad. Para resolver el problema de la enfermedad, el diagnosticador necesitará una descripción detallada de los signos físicos y de comportamiento exhibidos por los peces enfermos, registros diarios de los parámetros de calidad del agua, origen del pescado, fecha y tamaño del pescado en la población. tasa de alimentación, tasa de crecimiento y mortalidad diaria (Parker 2012; Plumb y Hanson 2011; Somerville et al. 2014).

17.5 ESTRATEGIAS DE TRATAMIENTO EN ACUAPONÍA

Las opciones de tratamiento para peces enfermos en un sistema de acuaponía son muy limitadas. Como tanto los peces como las plantas comparten el mismo circuito de agua, los medicamentos utilizados para los tratamientos de enfermedades pueden dañar o destruir fácilmente las plantas, y algunas pueden ser absorbidas por las plantas, causando períodos de abstinencia o incluso haciéndolas inutilizables para el consumo.

Los medicamentos también pueden tener efectos perjudiciales sobre las bacterias beneficiosas en el sistema. Si un tratamiento medicinal es absolutamente necesario, debe implementarse temprano en el curso de la enfermedad. El pescado enfermo se transfiere a un tanque separado (hospital, cuarentena) aislado del sistema para su tratamiento. Al devolver el pescado después del tratamiento, es importante no transferir los medicamentos utilizados al sistema acuapónico. Todas estas limitaciones requieren mejoras en las opciones de manejo de enfermedades con efectos negativos mínimos para los peces, las plantas y el sistema (Goddek et al. 2015, 2016; Somerville et al. 2014; Yavuzcan Yildiz et al. 2017). Uno de los tratamientos más usados y efectivos de la vieja escuela contra las infecciones bacterianas, fúngicas y parasitarias más comunes en los peces es un baño de sal (cloruro de sodio). La sal es beneficiosa para los peces, pero puede ser perjudicial para las plantas del sistema (Rakocy 2012), y todo el procedimiento de tratamiento debe realizarse en un tanque separado. Una buena opción es separar la unidad de recirculación de la acuicultura de la unidad hidropónica (sistemas de acuaponía desacoplados) (véase el capítulo 8). El desacoplamiento permite enfermedades de peces y opciones de tratamiento de agua que no son posibles en sistemas acoplados (Monsees et al. 2017) (véase el capítulo 7). Una mejora reciente para el control de ectoparásitos de pescado y la desinfección en los sistemas acuaponicos es el uso de Wofasteril (Kesla Pharma Wolfen GMBH, Bitterfeld-Wolfen, Alemania), un producto que contiene ácido peracético que no deja residuos en el sistema (Sirakov et al.2016) Alternativamente, se puede usar peróxido de hidrógeno, pero a una concentración mucho mayor. Si bien estos productos químicos tienen efectos secundarios mínimos, su presencia es indeseable en los sistemas acuaponicos y se requieren enfoques alternativos, como los métodos de control biológico (Rakocy 2012).

El método de control biológico (biocontrol) se basa en el uso de otros organismos vivos en el sistema, basándose en las relaciones naturales entre las especies (consumismo, depredación, antagonismo, etc.) (Sitjà-Bobadilla y Oidtmann 2017) para controlar los peces. patógenos En la actualidad, este método es una herramienta complementaria de gestión de

la salud de los peces con alto potencial, especialmente en sistemas acuaponicos. La implementación más exitosa del cultivo de biocontrol en peces es el uso de peces más limpios contra los piojos de mar (parásitos de la piel) en granjas de salmónse practica mejor en granjas noruegas donde el wrasse de limpieza (Labridae) se cultiva junto con el salmón. Los peces lábridos elimina y se alimenta de piojos de mar (Skiftesvik et al. 2013). Aunque la limpieza es menos común en peces de agua dulce, los plecos de leopardo (*Glyptoperichthys gibbiceps*), que conviven con la tilapia azul (*Oreochromis aureus*), mantienen con éxito la infección bajo control con *Ichthyophthirius multifiliis* al alimentarse de los quistes del parásito (Picón-Camacho et al. 2012). Este método de biocontrol es cada vez más importante en la acuicultura y puede considerarse en los sistemas acuaponicos. Además, debe tenerse en cuenta que los peces más limpios también pueden albergar patógenos que pueden transmitirse a las principales especies cultivadas. Por lo tanto, también deben someterse a procedimientos preventivos y de cuarentena antes de su introducción en el sistema.

Otro método de biocontrol, aún en la fase de aplicación exploratoria en cultivos de peces, es el uso de organismos que se alimentan y se filtran. Al reducir las cargas de patógenos en el agua, estos organismos pueden reducir las posibilidades de aparición de enfermedades (Sitjà-Bobadilla y Oidtmann 2017). Por ejemplo, Othman et al. (2015) demostraron la capacidad de los mejillones de agua dulce (*Pilsbryoconcha exilis*) para reducir la población de *Streptococcus agalactiae* en un sistema de cultivo de tilapia a escala de laboratorio. El potencial de este método de biocontrol en los sistemas de acuaponía aún no se ha probado, y se necesitan nuevos estudios para explorar las posibilidades no solo para el control de enfermedades de peces sino también para el control de patógenos de plantas.

El método de biocontrol más prometedor y mejor documentado es el uso de microorganismos beneficiosos como probióticos en la alimentación de peces o en el agua de cría. Su uso en sistemas acuaponicos como promotores del crecimiento y la salud de peces / plantas es bien conocido, y los probióticos también han demostrado su eficacia contra una variedad de patógenos bacterianos en diferentes especies de peces. Por ejemplo, en la trucha arcoiris, la dieta *Carnobacterium maltaromaticum* y *C. divergens* protegidos de las infecciones por *Aeromonas salmonicida* y *Yersinia ruckeri* (Kim y Austin 2006) y *Aeromonas sobria* GC2 incorporadas en el alimento previnieron con éxito la enfermedad clínica causada por *Lactococcus garvieae* y *Streptococcus iniae* (Brunt y Austin 2005). La dieta *Micrococcus luteus* redujo la mortalidad de la infección por *Aeromonas hydrophila* y mejoró el crecimiento y la salud de la tilapia del Nilo (Abd El-Rhman et al. 2009). Investigaciones recientes de Sirakov et al. (2016) ha hecho un buen

progreso en el biocontrol simultáneo de hongos parásitos en peces y plantas en un sistema acuaponico de recirculación cerrado. En total, más del 80% de los aislamientos (bacterias aisladas del sistema acuaponico) fueron antagónicos a ambos hongos (*Saprolegnia parasitica* y *Pythium ultimum*) en las pruebas in vitro. Las bacterias no se clasificaron taxonómicamente, y los autores asumieron que pertenecían al género Pseudomonas y a un grupo de bacterias del ácido láctico. Estos hallazgos, aunque son muy prometedores, aún no se han probado en un sistema acuaponico operativo.

Como alternativa final al tratamiento químico, sugerimos el uso de plantas medicinales con propiedades antibacterianas, antivirales, antifúngicas y antiparasitarias. Los extractos de plantas tienen varias características biológicas con un riesgo mínimo de desarrollar resistencia en los organismos objetivo (Reverter et al. 2014). Muchos informes científicos demuestran la efectividad de las plantas medicinales contra los patógenos de peces. Por ejemplo, la tilapia del Nilo alimentada con una dieta que contiene muérdago (*Viscum album coloratum*) aumentó la capacidad de supervivencia cuando se la desafió con *Aeromonas hydrophila* (Park y Choi 2012). La carpa mayor de la India mostró una reducción significativa de la mortalidad cuando se la retó con Aeromonas hydrophila y se la alimentó con dietas que contenían fl ujo espinoso (Achyranthes aspera) y ginseng indio (Withania somnifera) (Sharma et al. 2010; Vasudeva Rao y col. 2006). Los extractos de plantas medicinales también han demostrado su eficacia contra los ectoparásitos. En peces de oro, Yi et al. (2012) demostraron la efectividad de los extractos de Magnolia of fi cinalis y Sophora alopecuroides contra Ichthyophthirius multi fi liis, y Huang et al. (2013) mostraron que los extractos de Caesalpinia sappan, Lysimachia christinae, Cuscuta chinensis, Artemisia argyi y Eupatorium fortunei tienen un 100% de eficacia antihelmíntica contra Dactylogyrus intermedius. El uso de plantas medicinales en acuaponia es prometedor, pero aún se necesita más investigación para encontrar la estrategia de tratamiento adecuada sin efectos indeseables. Como se refiere por Junge et al. (2017), aunque la investigación sobre acuaponia se ha desarrollado en gran medida en los últimos años, el número de trabajos de investigación publicados sobre el tema sigue siendo dramáticamente bajo en comparación con los trabajos publicados relacionados con la acuicultura o la hidroponía. Sin embargo, la acuaponía, que todavía se considera una tecnología emergente, se caracteriza por tener un gran potencial para la producción de alimentos para la población mundial que, según los resultados de las Perspectivas de la Población Mundial de la ONU (ONU 2017), a mediados de 2017 ascendía a casi 7.600 millones. y, según las proyecciones, se espera que aumente a mil millones en 12 años, llegando a unos 8,6 mil millones en 2030. Sin

embargo, considerando los riesgos potenciales para la sostenibilidad de la acuaponía debido a enfermedades de peces, el desarrollo de buenas ideas y Los nuevos métodos y enfoques para el control de patógenos serán nuestro principal desafío para el futuro. Existe una necesidad apremiante de iniciar nuevos conocimientos para proporcionar una mejor base para la gestión de la salud de los peces y las plantas, y continuar desarrollando sistemas operativos y de infraestructura para la industria acuapónica. Las causas de las pérdidas de peces en los sistemas de acuaponía, las enfermedades específicas del sistema y la interacción y alteración de la comunidad microbiana, junto con los patógenos, son áreas prioritarias de estudio.

REFERENCIAS

Abd El-Rhman AM, Khattab YAE, Shalaby AME (2009) Micrococcus luteus and Pseudomonas species as probiotics for promoting the growth performance and health of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus.* Fish Shellfish Immunol 27:175–180. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2009.03.020

Afonso A, Matas RG, Maggiore A, Merten C, Robinson T (2017) EFSA's activities on emerging risks in 2016. EFSA Support Publ 14:1–59. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.EN-1336

Ahl AS, Acree JA, Gipson PS, McDowell RM, Miller L, McElvaine MD (1993) Standardization of nomenclature for animal health risk analysis. Rev Sci Tech 12:1045–1053

Anderson DP (1992) Immunostimulants, adjuvants, and vaccine carriers in fish: applications to aquaculture. Annu Rev Fish Dis 2:281–307. https://doi.org/10.1016/0959-8030(92)90067-8

Au DWT, Pollino CA, Wu RSS, Shin PKS, Lau STF, Tang JYM (2004) Chronic effects of suspended solids on gill structure, osmoregulation, growth, and triiodothyronine in juvenile green grouper Epinephelus coioides. Mar Ecol Prog Ser 266:255–264. https://doi.org/10.3354/meps266255

Austin B, Austin DA (2016) Bacterial fish pathogens: disease of farmed and wild fish, 6th edn. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32674-0

Aven T (2016) Risk assessment and risk management: review of recent advances on their founda- tion. Eur J Oper Res 253:1–13. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023

Bebak-Williams J, Noble A, Bowser P, Wooster G (2007) Fish health management. In: Timmons MB, Ebeling JM (eds) Recirculation aquaculture. Cayuga Aqua Ventures, Ithaca, NY, and Northeastern Regional Aquaculture Center. Publication No. 01-007, p 619–664

Bondad-Reantaso MG, Subasinghe RP (2008) Meeting the future demand

for aquatic food through aquaculture: the role of aquatic animal health. In: Fisheries for global welfare and environment, 5th World Fisheries Congress 2008, pp 197–207

Bondad-Reantaso MG, Subasinghe RP, Arthur JR, Ogawa K, Chinabut S, Adlard R, Tan Z, Shariff M (2005) Disease and health management in Asian aquaculture. Vet Parasitol 132:249–272. https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2005.07.005

Bondad-Reantaso MG, Arthur JR, Subasinghe RP (2008) Understanding and applying risk analysis in aquaculture, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 519

Brunt J, Austin B (2005) Use of a probiotic to control lactococcosis and streptococcosis in rainbow trout, Oncorhynchus mykiss (Walbaum). J Fish Dis 28:693–701. https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2005.00672.x

Copp GH, Russell IC, Peeler EJ, Gherardi F, Tricarico E, Macleod A, Cowx IG, Nunn AD, Occhipinti-Ambrogi A, Savini D, Mumford J, Britton JR (2016) European non-native species in aquaculture risk analysis scheme – a summary of assessment protocols and decision support tools for use of alien species in aquaculture. Fish Manag Ecol 23:1–11. https://doi.org/10.1111/ fme.12074

Das S, Sahoo PK (2014) Markers for selection of disease resistance in fish: a review. Aquac Int 22:1793–1812. https://doi.org/10.1007/s10499-014-9783-5

Evenhuis JP, Leeds TD, Marancik DP, LaPatra SE, Wiens GD (2015) Rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) resistance to columnaris disease is heritable and favorably correlated with bacterial cold water disease resistance. J Anim Sci 93:1546–1554. https://doi.org/10.2527/ jas.2014-8566

Goddek S (2016) Three-loop aquaponics systems: chances and challenges. In: Proceedings of the international conference on Aquaponics Research Matters, Ljubljana, Slovenia, 22 March 2016

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199

Goddek S, Espinal C, Delaide B, Jijakli M, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman K (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8:303. https://doi.org/10.3390/w8070303

Henryon M, Berg P, Olesen NJ, Kjær TE, Slierendrecht WJ, Jokumsen A, Lund I (2005) Selective breeding provides an approach to increase resistance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to the diseases, enteric redmouth disease, rainbow trout fry syndrome, and viral haemorrhagic septicaemia. Aquaculture 250:621–636.

https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.12.022
Huang A-G, Yi Y-L, Ling F, Lu L, Zhang Q-Z, Wang G-X (2013) Screening of plant extracts for anthelmintic activity against Dactylogyrus intermedius (Monogenea) in goldfish (Carassius auratus). Parasitol Res 112:4065–4072. https://doi.org/10.1007/s00436-013-3597-7
Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:1–9. https://doi.org/10.3390/w9030182
Kabata Z (1985) Parasites and diseases of fish cultured in the tropics. Taylor & Francis, London
Kim D-H, Austin B (2006) Innate immune responses in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss, Walbaum) induced by probiotics. Fish Shellfish Immunol 21:513–524. https://doi.org/10.1016/ j.fsi.2006.02.007
Koshio S (2016) Immunotherapies targeting fish mucosal immunity – current knowledge and future perspectives. Front Immunol 6:643. https://doi.org/10.3389/fimmu.2015.00643
Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023
MacDiarmid SC (1997) Risk analysis, international trade, and animal health. In: Molak V (ed) Fundamentals of risk analysis and risk management. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, pp 377–387
Mackenzie R, Burhenne-Guilmin F, La Viña AGM, Werksman JD, Ascencio A, Kinderlerer J, Kummer K, Tapper R (2003) An explanatory guide to the Cartagena protocol on biosafety. IUCN, Gland and Cambridge, UK, p 295
Martin SAM, Król E (2017) Nutrigenomics and immune function in fish: new insights from omics technologies. Dev Comp Immunol 75:86–98. https://doi.org/10.1016/j.dci.2017.02.024
McIntosh D (2008) Aquaculture risk management. NRAC Publication No. 107. 1 Feb 2018. http://www.mdsg.umd.edu/sites/default/files/files/107-Risk%20management.pdf
McLoughlin MF, Graham DA (2007) Alphavirus infections in salmonids - a review. J Fish Dis 30:511–531. https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2007.00848.x
Monsees H, Kloas W, Wuertz S (2017) Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12:e0183056. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056
Müller-Graf C, Berthe F, Grudnik T, Peeler E, Afonso A (2012) Risk assessment in fish welfare, applications and limitations. Fish Physiol Biochem 38:231–241. https://doi.org/10.1007/ s10695-011-9520-1
Noga E (2010) Fish disease: diagnosis and treatment, 2nd edn. Wiley-Blackwell, Ames. https://doi. org/10.1002/9781118786758

Nowak BF (2004) Assessment of health risks to southern bluefin tuna under current culture conditions. Bull Eur Assoc Fish Pathol 24:45–51

Oidtmann B, Peeler E, Lyngstad T, Brun E, Bang Jensen B, Stärk KDC (2013) Risk-based methods for fish and terrestrial animal disease surveillance. Prev Vet Med 112:13–26. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.07.008

OIE (2017) Aquatic animal health code. Office International des Epizooties, Paris. 1 Feb 2018. http://www.oie.int/index.php?id¼171&L¼0&htmfile¼preface.htm

Othman F, Islam MS, Sharifah EN, Shahrom-Harrison F, Hassan A (2015) Biological control of streptococcal infection in Nile tilapia Oreochromis niloticus (Linnaeus, 1758) using filter- feeding bivalve mussel Pilsbryocon chaexilis (Lea, 1838). J Appl Ichthyol 31:724–728. https://doi.org/10.1111/jai.12804

Palm HW, Seidemann R, Wehofsky S, Knaus U (2014a) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part I: system design, chemo-physical parameters and general aspects. AACL Bioflux 7:20–32

Palm HW, Bissa K, Knaus U (2014b) Significant factors affecting the economic sustainability of closed aquaponic systems. Part II: fish and plant growth. AACL Bioflux 7:162–175

Park K-H, Choi S-H (2012) The effect of mistletoe, Viscum album coloratum, extract on innate immune response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Fish Shellfish Immunol 32:1016–1021. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2012.02.023

Parker R (2012) Aquaculture science, 3rd edn. Delmar, Cengage Learning, Clifton Park Peeler EJ, Taylor NG (2011) The application of epidemiology in aquatic animal health -opportu- nities and challenges. Vet Res 42:94. https://doi.org/10.1186/1297-9716-42-94

Peeler EJ, Murray AG, Thebault A, Brun E, Giovaninni A, Thrush MA (2007) The application of risk analysis in aquatic animal health management. Prev Vet Med 81:3–20. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2007.04.012

Picón-Camacho SM, Leclercq E, Bron JE, Shinn AP (2012) The potential utility of the leopard pleco (Glyptoperichthys gibbiceps) as a biological control of the ciliate protozoan Ichthyophthirius multifiliis. Pest Manag Sci 68:557–563. https://doi.org/10.1002/ps.2293

Plumb JA, Hanson LA (2011) Health maintenance and principal microbial diseases of cultured fishes, 3rd edn. Wiley-Blackwell, Oxford. https://doi.org/10.1002/9780470958353

Rakocy J (2012) Aquaponics-integrating fish and plant culture. In: Tidwell J (ed) Aquaculture production systems. Wiley-Blackwell, Ames, pp 3–386. https://doi.org/10.1002/9781118250105

Rakocy JE, Masser MP, Losordo TM (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics- integrating fish and plant culture. SRAC Publication No. 454. 1 Feb 2018. http://www.aces.edu/dept/fisheries/aquaculture/documents/309884-SRAC454.pdf

Reverter M, Bontemps N, Lecchini D, Banaigs B, Sasal P (2014) Use of plant extracts in fish aquaculture as an alternative to chemotherapy: current status and future perspectives. Aquacul- ture 433:50–61. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.05.048

Rivera-Torres O (2003) The biosafety protocol and the WTO, 26 B.C. Int Comp L Rev 263, http://lawdigitalcommons.bc.edu/iclr/vol26/iss2/7

Sharma A, Deo AD, Riteshkumar ST, Chanu TI, Das A (2010) Effect of Withania somnifera (L. Dunal) root as a feed additive on immunological parameters and disease resistance to *Aeromonas hydrophila* in *Labeo rohita* (Hamilton) fingerlings. Fish Shellfish Immunol 29:508–512. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2010.05.005

Sirakov I, Lutz M, Graber A, Mathis A, Staykov Y, Smits T, Junge R (2016) Potential for combined biocontrol activity against fungal fish and plant pathogens by bacterial isolates from a model aquaponic system. Water 8:518. https://doi.org/10.3390/w8110518Sitjà-Bobadilla A, Oidtmann B (2017) Integrated pathogen management strategies in fish farming. In: Jeney G (ed) Fish diseases: prevention and control strategies. Academic, London, pp 119–144. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804564-0.00005-3

Skiftesvik AB, Bjelland RM, Durif CMF, Johansen IS, Browman HI (2013) Delousing of Atlantic salmon (Salmo salar) by cultured vs. wild ballan wrasse (Labrus bergylta). Aquaculture 402–403:113–118. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.03.032

Snieszko SF (1974) The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes. J Fish Biol 6:197–208

Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture, Rome

Sterling P, Eyer J (1988) Allostasis: a new paradigm to explain arousal pathology. In: Fischer S, Reason J (eds) Handbook of life stress, cognition and health. Wiley, Chichester, pp 629–639

Subasinghe RP (2005) Epidemiological approach to aquatic animal health management: opportu- nities and challenges for developing countries to increase aquatic production through aquacul- ture. Prev Vet Med 67:117–124. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2004.11.004

Tacchi L, Bickerdike R, Douglas A, Secombes CJ, Martin SAM (2011) Transcriptomic responses to functional feeds in Atlantic salmon (Salmo salar). Fish Shellfish Immunol 31:704–715. https://

doi.org/10.1016/j.fsi.2011.02.023
UN (2017) United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, World Population Prospects 2017 - Data Booklet (ST/ESA/SER.A/401). 1 Feb 2018. https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/WPP2017_DataBooklet.pdf
Vasudeva Rao Y, Das BK, Jyotyrmayee P, Chakrabarti R (2006) Effect of Achyranthes aspera on the immunity and survival of Labeo rohita infected with Aeromonas hydrophila. Fish Shellfish Immunol 20:263–273. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2005.04.006
Winton J (2002) Fish health management. In: Wedemayer G (ed) Fish hatchery management, 2nd edn. American Fisheries Society, Bethesda, pp 559–640
Xue S, Xu W, Wei J, Sun J (2017) Impact of environmental bacterial communities on fish health in marine recirculating aquaculture systems. Vet Microbiol 203:34–39. https://doi.org/10.1016/j. vetmic.2017.01.034
Yavuzcan Yıldız H, Seçer SF (2017) Stress and fish health: towards an understanding of allostatic load. In: Berillis P (ed) Trends in fisheries and aquatic animal health. Bentham Science Publishers, Sharjah, pp 133–154. https://doi.org/10.2174/9781681085807117010 1
Yavuzcan Yildiz H, Robaina L, Pirhonen J, Mente E, Domínguez D, Parisi G (2017) Fish welfare in aquaponic systems: its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces-a review. Water 9:13. https://doi.org/10.3390/w9010013
Yi Y-L, Lu C, Hu X-G, Ling F, Wang G-X (2012) Antiprotozoal activity of medicinal plants against Ichthyophthirius multifiliis in goldfish (*Carassius auratus*). Parasitol Res 111:1771–1778. https://doi.org/10.1007/s00436-012-3022-7

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 18

ACUAPONÍA COMERCIAL: UN LARGO CAMINO POR DELANTE.

Maja Turnšek, Rolf Morgenstern, Iris Schröter, Marcus Mergenthaler, Silke Hüttel, and Michael Leyer

Capítulo 18

ACUAPONÍA COMERCIAL: UN LARGO CAMINO POR DELANTE

Maja Turnšek, Rolf Morgenstern, Iris Schröter, Marcus Mergenthaler, Silke Hüttel, and Michael Leyer

Resumen

Los sistemas acuaponicos abstractos a menudo se designan como sistemas de producción de alimentos sostenibles que aún enfrentan varios desafíos, especialmente cuando se consideran como un esfuerzo comercial que necesita competir en el mercado. Las primeras etapas de la industria de acuaponía han sido testigos de una serie de declaraciones poco realistas sobre la ventaja económica de la acuaponía. Este capítulo trata estos temas y los discute críticamente. La literatura científica más reciente y las experiencias personales actuales de los productores europeos de acuaponía comercial se tienen en cuenta en tres niveles: primero el de la producción hortícola, segundo la producción acuícola y los primeros datos sobre la respuesta del mercado a la acuaponía, enfatizando los problemas de comercialización y aceptación pública de acuaponía. En resumen, el capítulo no proporciona una solución "fuera de lo común" para evaluar el desempeño económico de un sistema de acuaponía particular en cambio, proporciona una base de datos amplia que permite una estimación de la eficacia de un sistema planificado de manera más realista, señalando los desafíos que enfrentaron los primeros usuarios de acuaponía comercial que son lecciones importantes para futuros esfuerzos acuaponicos, particularmente en Europa.

Palabras clave: Acuaponia Comercial, Mitos económicos de acuaponía, · Comercialización de la acuaponia

J. Goot (*)
Geography and Environment, University of Southampton, Southampton, UK
e-mail: j.gott@soton.ac.uk
R. Morgenstern
Department of Agriculture, University of Applied Sciences of South Westphalia, Soest, Germany
e-mail: morgenstern.rolf@fh-swf.de
M. Turnšek
Faculty of Tourism, University of Maribor, Brežice, Slovenia
e-mail: maja.turnsek@um.si

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_17

18.1 INTRODUCCIÓN: MÁS ALLÁ DE LOS MITOS

Aunque hemos sido testigos de los primeros desarrollos de la investigación en acuaponia desde fines de la década de 1970 (Naegel 1977; Lewis et al. 1978), todavía hay un largo camino por delante para la evaluación económica sólida de acuaponía la industria se está desarrollando lentamente y, por lo tanto, los datos disponibles a menudo se basan en casos modelo de investigaciones y no en sistemas comerciales. Después de las conclusiones positivas iniciales sobre los potenciales económicos de la acuaponía en entornos basados en la investigación de los sistemas de baja inversión en los EE. UU., Principalmente el sistema en las Islas Vírgenes (Bailey et al. 1997) y Alberta (Savidov y Brooks 2004), la acuaponía comercial encontró un alto nivel de entusiasmo temprano en contextos comerciales, a menudo basado en expectativas poco realistas.

Para proporcionar un ejemplo específico, en su pronóstico inicial del mercado, IndustryARC (2012) anticipó que la acuaponía como industria tiene un tamaño de mercado potencial de alrededor de $ 180 millones en 2013 y se espera que alcance $ 1 mil millones en ventas en 2020; más tarde proyectaron aumentar la acuaponía a $ 409 millones en 2015 a $ 906.9 millones para el año 2021 (IndustryARC 2017). El mismo informe (IndustryARC 2012) proporcionó una serie de afirmaciones aún no probadas sobre acuaponía, por ejemplo, sobre la superioridad económica de la acuaponía en términos de producción, tiempo de crecimiento y posibilidades de diversificación en un entorno comercial. Nombramos tales afirmaciones aquí como "mitos económicos de acuaponia" que han sido una parte típica de las primeras exageraciones alimentadas por Internet en acuaponía comercial.

La declaración fue la siguiente: "Aquaponics usa 90% menos tierra y agua que la agricultura, pero también tiene el potencial de generar de 3 a 4 veces más alimentos que este último" (IndustryARC 2012). Comentarios como estos son extremadamente vagos, ya que no está claro con qué se compara exactamente la acuaponía cuando los autores se refieren a la "agricultura". Aunque la acuaponía usa menos agua que la producción de alimentos plantadas en el suelo, ya que el agua utilizada se puede perderse en el por filtración en el mismo o no ser absorbida por las plantas en comparación con permanecer en un circuito de recirculación con acuaponía.

La cantidad exacta de ahorro de agua depende del tipo de sistema demás, "3 a 4 veces más nutrintes " parece muy exagerado. La acuaponía puede tener rendimientos comparables a la hidroponía (por ejemplo, Savidov y Brooks 2004; Graber y Junge, 2009). Sin embargo, la declaración pasa por alto el

hecho de que, al menos en acuaponía acoplada, deben hacerse los llamados compromisos operacionales para encontrar un equilibrio entre los parámetros óptimos para plantas y peces sanos (véanse los capítulos 1 y 8 de este manuscrito), lo que puede conducir a la acuaponía que tiene menores rendimientos en comparación a la hidroponía. Por lo tanto, declaraciones como las anteriores carecen de una definición clara del escenario de referencia y la unidad de comparación de referencia.

En una evaluación económica, en los niveles de producción más altos solo se pueden comparar significativamente si hay una referencia clara de los niveles de entrada requeridos para lograr esta salida. En la evaluación de los sistemas de acuaponía, Se podrían lograr mayores resultados por área en comparación con la agricultura convencional, sin embargo, los sistemas acuaponicos podrían requerir más energía, capital y aportes de trabajo. Solo referirse a la tierra como factor de entrada supone que otros factores de producción no son escasos, lo que difícilmente es el caso.

Por lo tanto, declaraciones como las anteriores divagan el principio de "todas las demás cosas son iguales" en las evaluaciones económicas. Vaclav Smil (2008) calcula y resume el gasto de energía de diferentes actividades agrícolas, utilizando la energía como el denominador común, y esto nos permite comparar diferentes métodos agrícolas con el enfoque acuaponico.

Un mito similar está contenido en la declaración: "Una ventaja importante de la industria de acuaponia es que se puede acelerar el tiempo de producción de cultivos" (IndustryARC 2012). La aceleración de la producción de cultivos depende necesariamente de la cantidad de nutrientes y agua, oxígeno y dióxido de carbono en la atmósfera circundante y la luz y la temperatura disponibles para los cultivos, factores que no son elementos de la acuaponía en sí, pero que se pueden agregar a través de prácticas de manejo de invernaderos, como fertilización y calefacción por riego y luces artificiales. Sin embargo, estos elementos adicionales aumentan tanto los costos de inversión como los costos operativos, a menudo son demasiado costosos para ser económicamente viables (dependiendo, por supuesto, de la ubicación, el tipo de cultivos y especialmente el precio de la producción de los cultivos).

Otra ventaja económicamente importante de la acuaponía proporcionada en el informe fue que “La acuaponía es un proceso adaptable que permite una diversificación de las fuentes de ingresos se pueden producir cultivos dependiendo del interés del mercado local y del interés del productor” (IndustryARC 2012). Lo que afirma es el hecho de que la diversificación de

la producción siempre tiene un precio. La diversificación de cultivos necesariamente incluye mayores niveles de conocimiento y mayores demandas laborales cuanto mayor sea la variedad de cultivos, más difícil será cumplir con las condiciones óptimas para todos los cultivos seleccionados. Por lo tanto, la producción comercial a gran escala busca parámetros constantes para un número limitado de cultivos que necesitan condiciones de crecimiento similares, lo que permite grandes resultados para implementar la distribución a través de grandes socios de distribución, como cadenas de supermercados y permitir el mismo almacenamiento y equipo de procesamiento potencial y proces. Dicha producción a gran escala puede utilizar economías de escala para reducir los costos unitarios, un principio básico en la evaluación económica, que no suele ser el caso de la acuaponía en escalas de producción más pequeñas.

Finalmente, la declaración más importante proporcionada en el informe fue que "el retorno de la inversión (ROI) para los sistemas de acuaponía varía de 1 a 2 años, dependiendo de la experiencia del agricultor y la escala de la agricultura" (IndustryARC 2012). Tales declaraciones deben tomarse con extrema precaución. Los escasos datos disponibles sobre el rendimiento de las inversiones informan sobre un tiempo mucho más largo: según Adler et al. (2000), se requieren 7.5 años de retorno para una inversión de aproximadamente $ 300,000 en el hipotético escenario de un sistema de lechuga y trucha arcoiris. Recientemente, Quagrainie et al. (2018) informaron un período similar de 6,8 años para la recuperación de una inversión en acuaponía si los productos solo se pueden vender a precios no orgánicos. Es extremadamente difícil obtener datos reales sobre la economía de la acuaponía, ya que las empresas que se han aventurado en la acuaponía comercial son reacias a compartir sus datos. En los casos en que las empresas se desempeñan bien, tampoco comparten sus datos, ya que se consideran un secreto comercial, o si comparten datos, dichos datos deben tomarse con precaución, ya que normalmente estas empresas tienen interés en vender equipos de acuaponía, ingeniería y consultoría. Además, las empresas que no han logrado obtener rentabilidad prefieren no compartir públicamente sus fallas.

Estos "mitos" circulan continuamente en línea entre los entusiastas de acuaponía no experimentados, alimentados por la esperanza de obtener altos rendimientos y un camino hacia una producción alimentaria más sostenible en el futuro. Por lo tanto, es necesario ir más allá de los mitos y analizar las empresas individuales y proporcionar un análisis en profundidad sobre la economía básica y general de la acuaponía.

Incluso si se dispusiera de datos realistas sobre acuaponía, debe conside-

rarse que dichos análisis se basan en casos únicos ya que los sistemas de acuaponía están lejos de los sistemas de producción técnicamente estandarizados, la diversidad con respecto a los conceptos de comercialización es aún mayor. Por lo tanto, los datos de cada sistema de acuaponía carecen de generalización y solo pueden considerarse como un estudio de caso único. Por lo tanto, las declaraciones generales no son válidas si las condiciones marco y las especificaciones técnicas y de marketing no se hacen transparentes.

Las publicaciones periodísticas sobre acuaponía a menudo siguen una narrativa que detalla los desafíos generales de la agricultura global, como la reducción de las áreas agrícolas, la pérdida de humus y la desertificación y luego explican las ventajas de los métodos de producción de alimentos acuaponicos. Aparte del error antes mencionado de que, de hecho, la producción del sistema de ambiente controlado (CES) se compara con la producción de campo, no se hace distinción entre agricultura y horticultura. Mientras que el término "agricultura" técnicamente incluye horticultura, la agricultura en su sentido más específico es la producción de cultivos a gran escala. La horticultura es el cultivo de plantas, bajo una producción en invernadero donde la horticultura es la parte vegetal de la acuaponía y no la agricultura. Por lo tanto, comparar el rendimiento y otras propiedades de productividad de la acuaponía con la agricultura es simplemente comparar manzanas con naranjas.

La producción de cultivos a gran escala en la agricultura abarca principalmente la llamada producción de alimentos básicos: cereales como el maíz, la cebada y el trigo, las semillas oleaginosas como la colza y el girasol y las hortalizas de raíz con almidón como las patatas. El área agrícola de Alemania cubre 184.332 km² (Destatis, 2015) de eso, solo 2.290 km2 (1,3%) se utilizan para la horticultura del área hortícola, 9.84 km2 (0,0053%) están bajo invernadero. Las cifras absolutas y relativas para otros países seguramente difieren, por lo tanto, mejorar una pequeña fracción de nuestra producción de alimentos. Teóricamente, los alimentos básicos pueden producirse en CES bajo invernadero utilizando la hidrocultura como se demostró en la investigación de la NASA (Mackowiak et al. 1989) y seguramente también podrían cultivarse en sistemas acuaponicos, pero debido a la alta inversión necesaria para tal producción, no tiene sentido pensar en acuaponía que reemplaza la producción de estos cultivos en las actuales condiciones económicas y de recursos mundiales.

18.2 MODELOS HIPOTÉTICOS, ESTUDIOS DE CASOS A PEQUEÑA ESCALA Y ENCUESTAS ENTRE AGRICULTORES

Las primeras investigaciones sobre acuaponía comercial se centraron en la evaluación y el desarrollo de estudios de casos específicos, en su mayoría dirigidos por institutos de investigación estos primeros resultados fueron muy positivos y optimistas sobre el futuro de la acuaponía comercial. Bailey y col. (1997) concluyeron que, al menos en el caso de las Islas Vírgenes, las granjas acuaponicas pueden ser rentables. Savidov y Brooks (2004) informaron que los rendimientos de pepinos y tomates calculados anualmente excedían los valores promedio para la producción comercial de invernaderos basada en tecnología hidropónica convencional en Alberta. Adler y col. (2000) realizaron un análisis económico de un escenario esperado para 20 años de producción de lechuga y trucha arcoiris y argumentaron que la integración de los sistemas de producción de peces y plantas produce ahorros en los costos económicos con respecto a cualquiera de los dos sistemas llegando a la conclusión de que un aprox. Una inversión de $ 300,000 tendría un período de recuperación de 7,5 años.

Los modelos de optimización dinámica basados en la tecnología se usan comúnmente para representar las relaciones de ingeniería de producción en sistemas de acuaponía (Karimanzira et al. 2016; Körner et al. 2017). Es notable que hasta ahora casi no se consideran escalas diferentes, y estudios previos como Tokunaga et al. (2015) y Bosma et al. (2017) se limitan a la acuaponía a pequeña escala para la producción local de alimentos o se realizan con datos de instalaciones de investigación, como los sistemas de acuaponía de la Universidad de las Islas Vírgenes (Bailey y Ferrarezi 2017). Además, como señala Engle (2015), la literatura sobre la economía de la acuaponía es escasa, y gran parte de la literatura se basa principalmente en modelos de acuaponía. Sin datos agrícolas realistas, tales proyecciones a menudo son demasiado optimistas porque carecen de detalles sobre los gastos y los problemas de la producción.

los alimentos y los servicios públicos y no incluyen los riesgos cotidianos involucrados en la agricultura en esta investigación sobre la economía de la acuaponía, las funciones de producción se reproducen solo parcialmente y las cuestiones de optimización basada en procesos se abordan solo hasta cierto punto. Leyer y Hüttel (2017) demostraron el potencial de la contabilidad de inversiones como parte de un análisis inicial para capturar varios parámetros de una instalación de acuaponía. Además, Engle (2015) señala las dificultades de estimar los costos anuales para operar en granjas de acuaponía ya que muchos de estos sistemas son bastante nuevos; también señala que el modelado se basa en situaciones hipotéticas y que se

necesitan datos agrícolas más realistas, en los que se incurra diariamente en gastos inesperados, "de pantallas que se obstruyen, bombas que fallan o tormentas que causan daños". A medida que la acuaponía comenzó a crecer tanto como una actividad de bricolaje (Love et al.2014) como una industria (Love et al. 2015), surgieron investigaciones sobre estudios de casos de granjas comerciales reales. Se realizaron estudios de casos específicos de producción de acuaponía por ejemplo, en Puerto Rico (Bunyaviroch 2013) y Hawai (Tokunaga et al. 2015), incluido también el estudio de caso de una empresa social de acuaponía a pequeña escala (Laidlaw 2013) (ver cap.24).

Con el aumento continuo en el número de productores de acuaponía, surgieron los primeros análisis en profundidad del estado del arte de la industria, centrados principalmente en los Estados Unidos, estos estudios mostraron una imagen menos optimista de la industria emergente. Love y col. (2015) realizaron una encuesta internacional entre 257 participantes, que en los últimos 12 meses vendieron productos y servicios alimentarios o no alimentarios relacionados con la acuaponía. Solamente el 37% de estos participantes podrían ser nombrados únicamente como productores comerciales que obtuvieron sus ingresos vendiendo solo pescado o plantas. El 36% de los encuestados combinaron las ventas de productos con materiales o servicios relacionados con la acuaponía: venta de suministros y equipos, tarifas de consultoría para el diseño o construcción de instalaciones de acuaponía y tarifas asociadas con talleres, clases, oratoria o agroturismo. Finalmente, aproximadamente un tercio (27%) eran organizaciones que vendían solo materiales o servicios relacionados con la acuaponía y no productos. El sitio promedio de producción de acuaponía de 143 productores estadounidenses fue de 0,01 ha. Al comparar esto con la producción hidropónica general en Florida (29,8 ha), Love et al. (2015) concluyeron que el tamaño de los productores de acuaponía es significativamente menor que la producción hidropónica y es, en gran medida, más una actividad de pasatiempo que las empresas comerciales exitosas. En términos de volumen de agua, las granjas de acuaponía informaron tamaños comparables a las granjas de acuicultura RAS típicas en los Estados Unidos. Sin embargo, casi una cuarta parte de los encuestados (24%) no cosechó ningún pescado en los últimos 12 meses, y el tamaño total estimado de la producción de pescado fue de 86 toneladas, que es menos del 1% de la industria de tilapia cultivada en los Estados Unidos.

Según el mismo estudio, la acuaponía fue la principal fuente de ingresos para solo el 30% de los encuestados, y solo el 31% de los encuestados informó que su operación fue rentable en los últimos 12 meses. Por ejemplo, el encuestado promedio recibió solo $ 1000 a $ 4999 en los últimos 12 meses, y solo el 10% de los encuestados recibió más de $ 50,000 en los

últimos 12 meses. Esto llevó a Love et al. (2015) concluir que las granjas de acuaponía eran granjas de pequeña escala, lo que es comparable a la agricultura en general, ya que las granjas con ingresos brutos de menos de $ 50,000 constituyeron aproximadamente el 75% de todas las granjas en los EE. UU. Y granjas con menos de $ 50,000 generalmente se venden solo alrededor de $ 7800 en ventas locales de alimentos, por lo que es necesario combinar los ingresos agrícolas con otras fuentes de ingresos. Por lo tanto, no es sorprendente que la acuaponia, como la agricultura a pequeña escala, dependa en gran medida del trabajo voluntario. Por lo general, había una gran cantidad de trabajadores no remunerados, familiares y voluntarios trabajando en estas pequeñas unidades, con un promedio de seis trabajadores no remunerados por instalación. Del mismo modo, Engle (2015) aborda el censo de 2012 en el que se informaron 71 granjas de acuaponia en los EE. UU. Que representaban el 2% de todas las granjas de acuicultura. De estos, solo el 11% tuvo ventas de $ 50,000 o más, en comparación con el 60% de las operaciones de acuicultura en estanques que tuvieron ventas de $ 50,000 o más.

Por otra parte, Engle (2015) señala las dificultades para obtener datos de estas granjas, por ejemplo, estimar los costos anuales para operar en granjas de acuaponia, ya que muchos de estos sistemas son bastante nuevos. En resumen, desde un punto de vista económico, existe una brecha de investigación en la medida en que no hay registros y análisis disponibles que incluyan declaraciones sobre sistemas económicamente viables. Se necesita investigación que tenga en cuenta (a) las curvas de posibilidades de producción (normativas), (b) el análisis combinado de peces y plantas que incluyen la retroalimentación entre ambos, (c) la eficiencia económica en combinación con la optimización de los procesos comerciales y la retroalimentación (proceso de producción de optimización simultánea y eficiencia económica) y (d) la consideración de diferentes escalas (eficiencia de escala) en el contexto de la sostenibilidad ambiental de este sistema agrícola, aun no existen datos completos y confiables que combinen factores clave como los volúmenes de producción, los derechos de los factores y las estructuras de costos, las estrategias de escala y ventas derivadas de las inversiones reales existentes en ese contexto los análisis de rentabilidad adicionales deben considerar los aspectos temporales y el riesgo al formular puntos de referencia normativos que a su vez pueden servir como base para las decisiones de inversión.

18.3 DATOS DE MODELADO HIPOTÉTICO DE EUROPA

En Hawái, Baker (2010) calculó el precio de equilibrio de la producción de lechuga acuaponia y tilapia basándose en una operación hipotética el

estudio estima que el precio de equilibrio de la lechuga es de $ 3.30 / kg y la tilapia es de $ 11.01 / kg. Aunque su conclusión es que este punto de equilibrio puede ser económicamente viable para Hawái, dichos precios de equilibrio son demasiado altos para la mayoría de los contextos europeos, especialmente cuando se comercializa a través de minoristas y canales de distribución convencionales en Filipinas, Bosma (2016) concluyó que la acuaponía solo puede ser financieramente sostenible si los productores logran asegurar nichos de mercado de alta gama para peces y grandes mercados para vegetales orgánicos frescos.

La acuaponía en las islas tropicales (Islas Vírgenes y Hawái) y las zonas cálidas y libres de heladas (Australia) contrastan mucho con los lugares más alejados del ecuador la ventaja en lugares cálidos son los menores costos de calefacción y la disponibilidad estacional de la luz del día, lo que permite que los sistemas sean de bajo costo puedan sobrevivir económicamente.

Una ubicación libre de heladas cerca del ecuador con pocas o ninguna diferencia estacional hace que sea más económico fácil de configurar y operar un sistema durante todo el año, lo que permite configuraciones de negocios familiares semiprofesionales en esas regiones. La producción local en estas áreas se valora más, ya que los cultivos de hoja verde son difíciles de almacenar (por ejemplo, Australia / calor) o difíciles de transportar a los clientes (islas) y generalmente tienen un margen de contribución mucho mayor que en lugares como Europa y América del Norte.

La acuaponía puede tener varias ventajas en un contexto urbano, siendo efectivas si se tienen en cuenta las condiciones específicas del marco urbano y si se realizan esfuerzos de comunicación adicionales. Smeets (2010) presenta los agroparques periurbanos como una solución técnica y económicamente viable para la agricultura urbana, que ofrece potencial de sinergia con la industria existente a través del calor residual y la logística adecuada, así como corrientes alternativas de materiales inorgánicos y orgánicos.

La acuaponía en la azotea utiliza espacios "vacíos" en áreas urbanas (Orsini et al. 2017). A menudo se supone que los tejados son gratuitos "porque están allí". Sin embargo, cada espacio en la ciudad es de alto valor. Un dueño de un El edificio siempre buscará ingresos por el espacio que ofrecen, incluso la utilización de tejados vacíos. Una granja en la azotea conlleva un alto riesgo económico y es posible que se deban realizar cambios en el edificio (respiraderos y logística). Los tejados también son interesantes para la producción de energía solar con menos riesgo para el

operador (véase también el capítulo 12).

Mientras que la acuaponia a menudo se promociona explícitamente como una tecnología de producción adecuada para entornos urbanos e incluso áreas con suelo contaminado, el costo inmobiliario a menudo se subestima por completo. Por ejemplo, los precios oficiales de bienes raíces en Alemania se pueden examinar a través de la herramienta en línea BORISplus (2018), revelando una brecha significativa entre los precios límite del centro de la ciudad y los precios de las tierras agrícolas.

Esta situación legal y financiera hace que las predios agrícolas cercanas a las zonas económicas sean atractivas para las granjas de acuaponia a gran escala, lo que lleva al concepto de agroparques mencionado anteriormente la colocación de granjas acuaponicas plantea desafíos con la percepción del cliente los ciudadanos que han sido entrevistados sobre su preferencia por los diferentes conceptos de agricultura urbana para el uso del suelo público en el centro de la ciudad mostraron una preferencia por el uso que mantiene el espacio accesible para los ciudadanos, así como un bajo nivel de aceptación de los agroparques (Specht et al.2016). Los resultados de la investigación sobre la aceptación de acuaponia revelaron una variación mayor que las otras posibles utilidades, lo que sugiere una ambivalencia ciudadana debido a la falta de información sobre el método de producción se requieren esfuerzos de comunicación adicionales ya que la acuaponía es un sistema de producción altamente complejo y desconocido para la mayoría de las personas en la sociedad, incluidas las poblaciones urbanas.

La mayoría de los datos recopilados actualmente sobre agricultores comerciales se centran en ubicaciones fuera de Europa en la cual una evaluación económica sólida de las instalaciones de acuaponia en latitudes y climas europeos es difícil, porque solo existen pocas plantas comerciales en Europa y los equipos técnicos, la escala y los modelos comerciales son muy diferentes en otras partes del mundo, donde la acuaponia comercial está más extendida (Bosma et al.2017). Mientras que Goddek et al. (2015) y Thorarinsdottir (2015) proporcionan una muy buena visión general de las plantas comerciales europeas y sus desafíos, presentan solo unos pocos parámetros económicos como los precios al consumidor; declaraciones sobre ingresos "potencialmente" alcanzables o precios de equilibrio para la producción .

Si bien hay algunas evaluaciones específicas de productividad (por ejemplo, Medina et al.2015, Petrea et al. 2016), el análisis completo del potencial de mercado y las evaluaciones de rentabilidad bien fundamentadas no se conocen en la actualidad; estudios iniciales sobre modelos

dinámicos técnicos que utilizan la metodología dinámica del sistema, según Goddek et al. (2016) y Körner y Holst (2017) es importante que la disponibilidad de datos sea completos para llevar a cabo un sólido análisis de rentabilidad.

Uno de los pocos casos de modelos hipotéticos creados con datos de Europa es Morgenstern's et al. (2017) proporcionaron datos técnicos de la planta piloto de la Universidad de Ciencias Aplicadas del Sur de Westfalia, que consistía en una granja comercial de peces y un sistema estándar de horticultura. En este caso, se modelaron los cálculos de inversión y costo total con datos técnicos detallados para sistemas en tres escalas diferentes lo cálculos realizados de los costos operativos para un período inicial de 6 años y costos de inversión, así como un cálculo simplificado de la diferencia en el rendimiento del costo para tres granjas acuaponicas de diferentes densidades de peces siluro (*Silurus glanis*) y producción de lechuga. Los datos se obtuvieron de la planta piloto ubicada en la Universidad de Ciencias Aplicadas de South Westphalia.

Los tamaños de acuicultura modelados fueron 3 m^3, 10 m^3 y 300 m^3 donde se hicieron un par de suposiciones generales y simplificaciones para los cálculos, que ilustran las críticas presentadas anteriormente sobre las limitaciones del modelado hipotético:

(a) Calidad de producción inferior a la media y pérdidas de producción dentro de la primera se han considerado 5 años. Los cálculos de rentabilidad se basan en un proceso de producción maduro y estable que comienza en el año 6.
(b) Producción constante de hidrocultivo. Se calculó que el flujo completo de nutrientes del agua se consumía en la producción de lechuga en el cultivo de la hidrocultura, independientemente de las diferencias estacionales y de la disponibilidad de nutrientes de la acuicultura.
(c) El tamaño del lecho de cultivo de hidrocultivo se ha calculado en 60 m^2, 200 m^2 y 5.500 m^2 .
(d) La demanda de calefacción para la hidrocultura y la acuicultura se ha aproximado con una metodología ligeramente modificada de KTBL (2009). La ubicación modelada de la granja es Düsseldorf, Alemania.
(e) Los costos de energía por kWh se han aproximado para la producción con un sistema combinado de calor y energía (CHP) con 15 ct / kWh (electricidad) y 5,5 ct / kWh (calor), respectivamente. Por simplicidad, un sistema CHP no ha sido modelado.
(f) Se asumió la comercialización directa de los productos, se han calculado los precios de mercado para los productos. No se han incluido costos de comercialización extendidos en el cálculo, ya que el esfuerzo de comer-

cialización requerido para construir una base de clientes y un mercado estable no se ha abordado en el proyecto. No tener en cuenta los costos de marketing supone que los precios de mercado en marketing directo no tienen costo y, por lo tanto, constituyen una simplificación importante del cálculo.

(g) No se han incluido costos relacionados con los bienes inmuebles requeridos para la granja. La razón de esta simplificación son los costos diferentes, según la ubicación y el contexto del proyecto.

(h) El costo de la mano de obra se ha calculado el salario mínimo, que es una suposición sólida con respecto a los altos niveles de capital humano requeridos para ejecutar sistemas complejos de acuaponía.

(i) Las pérdidas de mortalidad del 5% en el sistema de acuicultura se compensan con exceso de existencias al comienzo de cada ciclo de producción.

Un análisis de la estructura de costos del sistema acuicultura del tamaño de la producción muestra que la mano de obra, el alimento para peces y los juveniles y la energía son los principales generadores de costos, contribuyendo aproximadamente a un tercio de los costos principales cada uno. En este punto, debe enfatizarse que los costos de mano de obra se calculan sobre la base del salario mínimo y que los costos para el área ocupada de la granja no se han considerado en los cálculos (Fig. 18.1).

Los costos de electricidad y calefacción ofrecen posibilidades de optimización; las bombas tienen una vida útil entre 2 y 5 años cuando son ineficientes se pueden reemplazar por bombas más eficientes en el ciclo de vida de la máquina las ganancias de eficiencia de costos para este tipo de optimizaciones son fáciles de calcular, y las ganancias de eficiencia también son fáciles de monitorear después de la implementación. Medidas similares para reducir los costos de calefacción son relativamente fáciles de calcular. Por ejemplo, se pueden calcular los costos y los efectos de paneles de aislamiento adicionales, y también aquí las ganancias se pueden monitorear fácilmente.

Así mismo, se realizó un análisis de costos para la parte de hidrocultivo de sistemas modelados son los principales generadores de costos mano de obra, plántulas y costos de energía para iluminación y calefacción; una mayor madurez operativa de la producción, cuando se domina la curva de aprendizaje inicial, donde la producción interna de plántulas. La integración de este paso de producción puede ofrecer un potencial de optimización en relación con otros generadores de costos tales como: energía y mano de obra, la situación descrita anteriormente también es aplicable para la parte de hidrocultivo (Fig. 18.2).

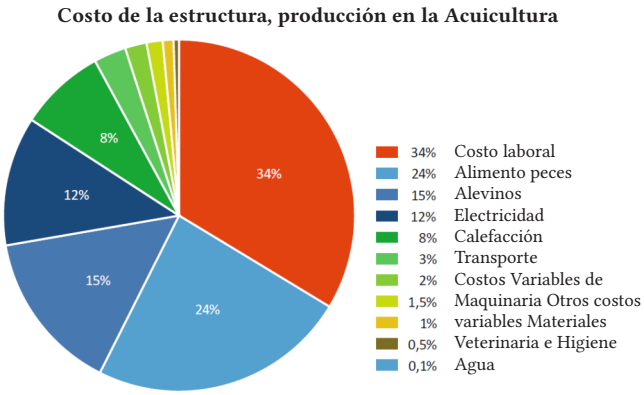


Fig. 18.1 Estructura de costos para la acuicultura bajo un sistema acuaponico, modelo hipotético a partir de datos técnicos de la planta piloto de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Westfalia del Sur. (Basado en Morgenstern et al. 2017).

Se ha realizado un análisis de diferencia de costo-rendimiento para los tres sistemas, tamaños, lo que demuestra que el microsistema y el sistema pequeño no son económicamente viables. No existe un potencial explotable de automatización y racionalización debido a los tamaños extremadamente pequeños de la acuicultura y los tamaños pequeños de la hidrocultura que resultan en costos laborales excesivamente costosos. El recargo por cantidad mínima y las tarifas de transporte para el alimento para peces y efectos similares para otras categorías de costos imponen una carga financiera adicional en estos dos sistemas.

El sistema de tamaño de producción tiene una diferencia de rendimiento de costo positivo cuando no se tienen en cuenta los costos de bienes inmue-

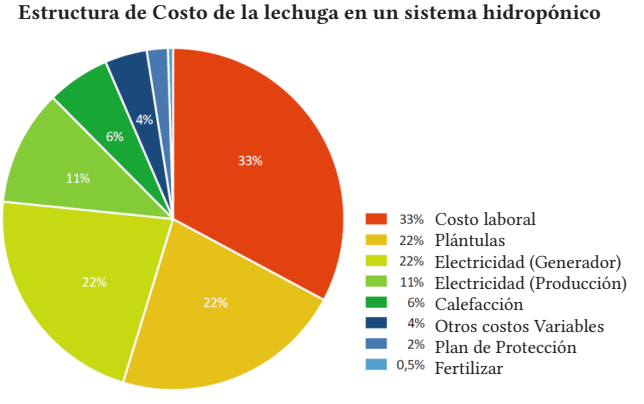


Fig. 18.2 Estructura de costos para el cultivo hidropónico en un sistema de acuaponía, modelo hipotético a partir de datos técnicos de la planta piloto de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Westfalia del Sur. (Basado en Morgenstern et al. 2017)

bles o la tenencia de la tierra requerida (Tabla 18.1).

El análisis también arroja potencial de la generación de empleo en los respectivos sistemas, donde el cálculo del modelo se realizó bajo el supuesto de que todas las tareas generales requeridas de la empresa son manejadas por empleados regulares, un supuesto que es bastante optimista con respecto al hecho de que el salario mínimo se ha utilizado para el cálculo.

Se realizo otra suposición con respecto a la separación de trabajos: los empleados trabajan en ambas partes del sistema, la acuicultura y la hidroponía, de acuerdo con el trabajo que necesita el sistema respectivo. Esto requiere un conjunto de habilidades elevado que pone otro signo de interrogación detrás del cálculo del salario mínimo.

Incluso en el sistema de producción de mayor tamaño, el número de empleos creados es limitado, el número calculado de trabajos es congruente con la experiencia de las empresas hortícolas que trabajan con cultivos hidropónicos, que generalmente emplean entre cinco y diez trabajadores por hectárea de invernadero (Tabla 18.2).

Los datos sobre inversiones iniciales en acuaponia son, por un lado, muy difíciles de obtener y, por otro lado, aún más difíciles de comparar. Algunos de los datos preliminares recopilados de otras fuentes sobre la inversión inicial necesaria para establecer una granja de acuaponia (ver Tabla 18.3) a continuación muestran grandes diferencias entre las inversiones iniciales

Tabla 18.1 Análisis de rentabilidad del cálculo del modelo.

Diferencia de rendimiento de costo	Unit	Micro	Pequeña	Producción
Margen de contribución acuicultura	€/a	4173	2566	114.862
Margen de contribución hidrocultivo	€/a	691	13.827	541.087
Sumar márgenes de contribución		3.483	11.260	655.948
Costo laboral acuicultura	€/a	3.705	8.198	45.000
Costo laboral hidroponia	€/a	3.148	8.395	179.443
Suma costos laborales	€/a	6.853	16.593	224.443
Bienes inmuebles		n.a	n.a	n.a
Depreciacion	€/a	7.573	15.229	185.269
Tasa de interés 2%	€/a	1.515	3.046	37.054
Diferencia de rendimiento de costo	€/a	19.424	23.607	209.183

Fuente: Morgenstern et al. (2017)

Tabla 18.2 Potencial de creación de empleo

	Unit	Micro	Pequeña	Producción
Suma del costo laboral	€/a	6.853	16.593	224.443
Tiempo de trabajo suma	Days/a	46	111	1.496
Numero de empleos		0,21	0,5	6,8

Fuente: Morgenstern et al. (2017)

en los sistemas, ya sea en modelos reales o hipotéticos. Dado que los sistemas difieren en la cantidad extrema de factores, es muy problemático sacar conclusiones con respecto a las inversiones iniciales necesarias. Sin embargo, la inversión inicial en acuaponia parece ser relativamente alta, lo que es un reflejo de la etapa inicial de la industria. Estimamos que comienza una inversión inicial en un sistema comercial de acuaponia en Europa con al menos 250 EUR / m² de área de crecimiento, pero puede requerir fácilmente una inversión mucho mayor, dependiendo de las condiciones externas, el tamaño y la complejidad del sistema y la duración de la temporada de crecimiento a la que aspira (Tabla 18.3).

El estado experimental y pionero de la acuaponia comercial es una de las razones por las cuales el financiamiento de proyectos más grandes a escala comercial puede ser un desafío, la mayoría de los sistemas de acuaponia se

Tabla 18.3 Costos estimados de inversión en acuaponia, varias fuentes

Fuente de literatura	Inversión total [Aprox. por m² de área de crecimiento]	Locacion	Tamaño y tipo de acuicultura	Tamaño hidropónico y tipo
Bailey et al. (1997)	$ 22,642 [$ 226/m²]	Islas Virgenes, USA	4 tanques Tilapia Sin calefaccion	100 m² Lechuga DWC Sin invernadero
Adler et al. (2000)	$ 244,720 [$ 240/m²]	Shepherdstown, WV, USA	19,000 l 239 m² trucha arcoiris Sin calefacción ($ 122,80)	cca. 120 m² Lechuga NFT ($ 17,150) Invernadero de polietileno con calefacción y luces. ($ 78,770)
Tokunaga et al. (2015)	$ 217,078 [$ 190/m²]	Hawai'i, USA	75.71 m³ Tilapia	1142 m² Lechuga DWC
Morgenstern et al. (2017)	€ 151.468 [€ 1067/m²]	Ubicación del modelo: Düsseldorf	3 m³ Pez gato Europeo	Área de cultivo de 59 m² Invernadero de 83 m² Lechuga DWC
Morgenstern et al. (2017)	€ 304.570 [€ 650/m²]	Ubicación del modelo: Düsseldorf	10 m³ Pez gato Europeo	195 m² de área de cultivo Invernadero de 274 m² Lechuga DWC
Morgenstern et al. (2017)	€ 3.705.371 [€ 302/m²]	Ubicación del modelo: Düsseldorf	300 m³ Pez gato Europeo	Área de lecho de cultivo de 5.568 m² Invernadero de 6.682 m² Lechuga DWC

han financiado a través de becas de investigación o de entusiastas de acuaponia. La comunicación personal con los bancos alemanes que tradicionalmente son fuertes en el financiamiento de inversiones agrícolas y que, por lo tanto, están familiarizados con las complejidades de la producción de cultivos y la cría de animales, reveló que no financiarían un proyecto de acuaponía debido a la falta de un modelo comercial probado y establecido (Morgenstern et al. 2017).

18.4 GRANJAS ACUAPONICAS EN EUROPA

Thorarinsdottir (2015) identificó diez unidades de acuaponia piloto en Europa, aproximadamente la mitad de las cuales se encontraban en la etapa de establecer sistemas todavía bastante pequeños para la producción comercial. Villarroel y col. (2016) estimó que el número de empresas comerciales de acuaponia en Europa comprendían aproximadamente 20 empresas. Actualmente, Villarroel (2017) identifica 52 organizaciones de investigación (universidades, escuelas vocacionales, institutos de investigación) y 45 empresas comerciales en Europa. Sin embargo, solo unos pocos de ellos venden productos acuaponicos y podrían considerarse como una granja acuaponica. En 2016, como resultado del proyecto COST FA1305, se fundó la Asociación de Empresas de Acuaponia Comercial (ACAC 2018), que actualmente involucra a 25 empresas de toda Europa, de las cuales solo un tercio se centra en la producción de alimentos. Otros ofrecen principalmente servicios relacionados con la acuaponía, como ingeniería y consultoría (Thorarinsdottir 2015).

En el resto de este capítulo, nos enfocamos en la información detallada de los pocos sistemas acuaponicos que operan en Europa en el momento de la acción COST (2014–2018), varias organizaciones comenzaron y probaron sus primeros intentos de comercialización en la producción comercial de alimentos con el objetivo de hacer que las ventas de productos fueran su principal ingreso. Hemos reunido datos con tres métodos cualitativos en profundidad: (a) visitas al sitio, (b) presentaciones de PYME en la conferencia COST FA 1305 (fecha, lugar) y (c) entrevistas en profundidad semiestructuradas.

18.4.1 Visitas al sitio

Dentro del proyecto COST FA1305, tres sistemas acuaponicos piloto europeos abrieron sus puertas para las visitas de los miembros de COST:

- Ponika, Eslovenia, Matej Leskovec
  (visita in situ realizada el 23 de marzo de 2016).

- UrbanFarmers AG, sistema en los Países Bajos, Andreas Graber
  (visita al sitio realizada el 6 de septiembre de 2016).
- Tilamur, España, Mariano Vidal
  (visita al sitio realizada el 20 de abril de 2017).

Dentro de las visitas al sitio, hicimos preguntas sobre el tipo y tamaño del sistema, la inversión inicial, los tipos de peces y cultivos producidos y el razonamiento detrás de esto y las experiencias de venta.

18.4.2 Presentaciones

COST FA1305 organizó una conferencia especial dedicada a las presentaciones de PYME de acuaponia en Europa en la Conferencia Internacional de PYME de acuaponia en la Universidad de Murcia (ES) (19 de abril de 2017). Solo analizamos las presentaciones y las respuestas a las preguntas de las PYME que presentaron sus experiencias con su propio sistema comercial de acuaponia:

- Bioaqua Farm, Reino Unido: Antonio Paladino.
- NerBreen, España: Fernando Sustaeta.
- Ponika, Eslovenia: Maja Turnsek.
- Samraekt Laugarmyri, Islandia: Ragnheidur Thorarinsdottir.
- Tilamur, España, Mariano Vidal.
- Uit Je Eigen Stad, Países Bajos: Ivo Haenen.

18.4.3 Seguimiento de entrevistas en profundidad

Realizamos entrevistas adicionales semiestructuradas de seguimiento adicionales con las PYME de acuaponia, contactando también con otros productores de acuaponia europeos, algunos de los cuales se negaron a participar. Los entrevistadores finales fueron:

- ECF, Alemania: Christian Echternacht
  (entrevista realizada el 13 de febrero de 2018).
- NerBreen, España: Fernando Sustaeta
  (entrevista realizada el 7 de abril de 2018).
- Ponika, Eslovenia: Maja Turnsek
  (entrevista realizada el 30 de enero de 2018).
- Samraekt Laugarmyri, Islandia: Ragnheidur Thorarinsdottir
  (entrevista realizada el 19 de febrero 2018).
- Uit Je Eigen Stad, Países Bajos: Ivo Haenen
  (entrevista realizada el 8 de febrero de 2018).

La entrevista promedio duró aprox. 60 min. e incluyó preguntas sobre las razones para elegir acuaponia, tipo y tamaño del sistema, tipo de producto y pescado, experiencias de cultivo, distribución y precio, planes futuros y perspectivas para acuaponia comercial en el futuro. A continuación presentaremos los resultados junto con la revisión de la literatura sobre cada una de las áreas de discusión (Tabla 18.4).

18.5 EL LADO DE LA HORTICULTURA DE LA ACUAPONIA COMERCIAL EN EUROPA

Petrea y col. (2016) realizaron un análisis comparativo y rentable en diferentes configuraciones de acuaponia, utilizando cinco cultivos diferentes: espinaca de hoja pequeña, espinaca, albahaca, menta y estragón en cultivos de aguas profundas y agregado de arcilla expandida ligera (LECA). Si bien el estudio se realizó en sistemas muy pequeños sin tener en cuenta ninguna oportunidad o potencial de aumento de escala, vale la pena discutir varios aspectos de los resultados presentados. Las camas de cultivo se han iluminado en diferentes regímenes de iluminación con bombillas fluorescentes y luces de cultivo de halogenuros metálicos. Las comparaciones de costos de la electricidad iluminan la parte importante que la iluminación de la planta tiene sobre el costo total de la electricidad. Además, el análisis arroja luz sobre la importancia de una selección de cultivos sensata. Mientras que el estragón se menciona como lo que a menudo se llama un "cultivo de alto valor" anteriormente en el texto, el análisis económico posterior del rendimiento del cultivo muestra que otros cultivos, la albahaca y la menta, generan un mayor valor económico por área de cultivo (Petrea et al. 2016, p. 563).

La comparación muestra un amplio rango de valor económico que va desde 5.70 € / m2 / ciclo (espinaca de hoja de bebé) hasta 2110 € / m2 / ciclo (albahaca) y 23.00 € / m2 / ciclo (menta). Siendo realistas, estas cifras no deben tomarse como puntos de referencia para producciones comerciales ampliadas, sino que ilustran cuán diferente puede ser la producción económica de la producción de cultivos. La Tabla 8 de la publicación detalla la variabilidad estacional del precio de mercado de los cultivos examinados. Las variaciones estacionales de estos cultivos son bastante moderadas, con precios ligeramente elevados en los meses de otoño e invierno. Las variaciones estacionales del precio de mercado para productos y frutas con mayores volúmenes en el mercado mundial, como los tomates y las fresas, suelen ser mucho más pronunciadas, lo que atrae a los productores a esforzarse en extender la temporada en ambos extremos. La iluminación artificial para la extensión de la temporada es costosa tanto para la inversión como para el costo operativo, pero bien podría valer la pena,

Table 18.4 Informacion general de las compañias acuaponicas entrevistadas en Europa.

Compañia	Ubicacion	Inversion Inicial	Tamaño total del Sistema	Tamaño de la planta de produccion	Tipo de plantas	Tipo de pescado	Años de operacion
ECF	Alemania	1.3 mio EUR	1800 m^2	1000 m^2	albahaca	Tilapia	2 Años
NerBreen	España	2 mio EUR	6000 m^2	3000 m^2	Lechuga, fresas, tomates, pimientos	Tilapia	5 Años los 500 m^2 Del Sistema piloto, 1,5 Años el Sistema grande
Ponika	Slovenia	100.000 EUR	Invernadero de 400 m^2 + reserva de agua y área de enfriamiento en un container	320 m^2	Albahaca recién cortada, cebollino y menta	Carpa, trucha, bajo de boca grande (se vende solo carpa e incluso eso solo como pescado vivo)	2 años, después de eso se detuvo la producción
Samraekt Laugarmyri	Islandia	640.000 EUR		1000 m^2	Tomate,Lechuga,Hierbas	Tilapia, Carbón ártico	El Proyecto commercial en fase de planificacion
Uit je Eigen Stad	Paises Bajos	Integrado en un proyecto más grande. Aprox.150.000 EUR– 200.000 EUR	400 m2	200 m^2	Variedades de lechuga	Pez gato africano, tilapia roja	Parcialmente operativo por 1 año. Nunca se vendieron productos. La operación cesó

especialmente teniendo en cuenta la presión inherente para utilizar el agua de proceso de la acuicultura en la temporada de poca luz.

No se ha puesto énfasis en la calidad del producto y la comercialización de la biomasa producida dentro de este estudio, la experiencia muestra que ciertos cultivos se adaptan con facilidad como la menta concideranose un cultivo fácil de cultivar, mientras que la producción de albahaca comercializable es más difícil. Petrea y col. (2016) cultivaron en aguas profundas y los lechos de cultivo de reflujo y flujo con sustrato LECA. Este último es particularmente poco común en la producción comercial, ya que tiene un potencial cercano a cero para la racionalización y la automatización. La albahaca generalmente se produce en cultivo en macetas en lugar de cortar y volver a producir menta que deja el portainjerto en el sistema con un rebrote más rápido de un producto comercializable. Además de los diferentes requisitos de medio de crecimiento, se producen diferentes cultivos con diferentes temperaturas, climas y regímenes de luz, la calidad óptima del producto solo se puede lograr con técnicas de cultivo óptimas; es importante recordar que los clientes están acostumbrados a una calidad superior y muestran poca tolerancia a cero para productos subóptimos.

El lado de la horticultura de la acuaponia comercial enfrenta altos riesgos de infestación de enfermedades o parásitos, que pueden ser difíciles de superar porque solo se pueden usar controles biológicos (véanse los capítulos 14 y 17). También implican grandes riesgos, ya que la mayoría de las granjas de acuaponia requieren un mercado que pagará precios más altos que el promedio por el cultivo. Finalmente, la acuaponia parece ser muy laboriosa ya que incluso los sistemas de acuaponía a pequeña escala son complejos debido a sus muchos componentes y requisitos (Engle 2015).

Para las nuevas empresas, puede ser tentador luchar por la producción de un amplio espectro de variedades novedosas de especies de plantas con aromas frutales u hojas coloridas. La salvia melón (Salvia elegans) o la menta piña (*Mentha suaveolens* "Variegata") son ejemplos de este tipo de variedades. Según los productores comerciales a pequeña escala en Soest, Alemania (no acuaponía; comunicación personal en verano de 2016), la demanda del mercado de variedades novedosas ha sido reconocida por los minoristas durante mucho tiempo y sus productores a gran escala la están abasteciendo.

Este segmento ya no es un nicho rentable, sino un mercado que sigue las tendencias anuales. El cambio por parte del productor de acuaponia ECF, con sede en Berlín, de un amplio espectro de las especies de plantas antes

mencionadas en su fase inicial a un monocultivo de albahaca que se comercializa a través del minorista alemán REWE refleja esta situación.

Christian Echternacht de ECF, Berlín, informó en la entrevista sobre la dificultad de establecer de manera sostenible un canal local de comercialización directa para una gama más amplia de productos de cantidad limitada. A partir de su experiencia de primera mano, la compañía decidió cambiar la producción del lado de la planta a un cultivo, albahaca en macetas, y comercializar este cultivo a través de un único minorista en más de 250 supermercados en la ciudad de Berlín. Curiosamente, el producto etiquetado regionalmente (Hauptstadtbasilikum / Capital City Basil) sin una etiqueta orgánica se coloca directamente al lado de la albahaca etiquetada orgánicamente de fuentes no regionales y se informa que genera mayores ventas a pesar de los precios ligeramente más altos. NerBreen, con sede en España y su tamaño de 6000 m2, es actualmente el sistema más grande de Europa. Está más enfocado en el elemento de la acuicultura e incluye la acuaponia como uno de varios medios de filtración de agua, pero la producción de la planta todavía es de 3000 m^2 y produce lo suficiente como para crear un mercado.

Actualmente se encuentran en la segunda temporada de producción dentro de la granja, con 5 años de experiencia previa con una planta piloto más pequeña (tamaño total de la granja piloto, 500 m^2). En la temporada de invierno, ahora cultivan ajo fresco, plantas de fresa sin fruta (ya que las plantas deben mantenerse durante 3 años) y cuatro tipos diferentes de lechuga. En el verano, reemplazan el ajo con tomates cherry y pimientos, pero conservan las fresas y las mismas variedades de lechuga. Como esta es solo la segunda temporada, es muy difícil para ellos proporcionar una cantidad promedio de productos. El último invierno fue muy frío y afectó significativamente el crecimiento de la lechuga. En la primera temporada, cuando todavía intentaban mejorar y ganar experiencia, produjeron alrededor de 3 toneladas de fresas, 5 toneladas de tomates y 60,000 cabezas de lechuga. Sus esperanzas son aumentar la producción, mientras que, al mismo tiempo, su estrategia pasó de centrarse en la cantidad a la calidad y la variedad. En el primer año de su producción, tuvieron una buena temporada con tomates en términos de cantidad, pero el mercado general se inundó de tomates, y el precio fue posteriormente demasiado bajo. Se ajustaron a este problema con un enfoque en variedades de tomates cherry más selectas, ya que el precio es mejor, y no quieren competir con la cantidad sino con la calidad, tratando de alcanzar un precio más alto con los minoristas.

Los cultivos producidos localmente y los cultivares de nicho parecen ser

las direcciones principales para la selección de cultivos en los países europeos. La empresa eslovena Ponika se propuso vender hierbas frescas cortadas en su sistema de 400 m², ya que proporciona productos especializados en el mercado esloveno sin ningún otro productor local de hierbas frescas cortadas. La compañía basó su justificación en tres razones principales: la primera fue que los datos disponibles, aunque escasos, de las granjas de acuaponia de EE. UU. Mostraron que las hierbas recién cortadas parecían ser los cultivos que tenían éxito en acuaponía y ganaron un precio más alto en el mercado.

El segundo fue los años de experiencia positiva en el jardín de acuaponia de bricolaje a pequeña escala con estos cultivos. Además, el tercero fue la retroalimentación positiva recibida de los distribuidores de hierbas recién cortadas en Eslovenia con respecto al interés en los cultivos.

La compañía se propuso producir hierbas frescas y logró venderlas a los gastro-distribuidores eslovenos durante dos temporadas, reduciendo el número inicial de cultivos de seis a tres: cebollas frescas cortadas, albahaca y menta. Otras hierbas recién cortadas que probaron resultaron ser demasiado sensibles o hubo una demanda demasiado pequeña e infrecuente en el mercado; el plan era primero vender las hierbas recién cortadas a los gastro-distribuidores y luego gradualmente, proceda a venderlos a cadenas minoristas a gran escala, sin embargo los riesgos fueron grandes en la producción (por ejemplo, la albahaca le dio mildiu polvoriento y puntas amarillas en el cebollin) un sistema demasiado pequeño para poder asegurar una producción constante como lo solicitan las cadenas de distribución a gran escala. Aunque los márgenes de ganancia serían más altos, Ponika nunca comenzó a vender a las cadenas minoristas, ya que los contratos incluían sanciones financieras en el caso de que la granja no pudiera entregar los pedidos. En ese sentido las cadenas minoristas hicieron pedidos semanales, a no realizar una planificación adecuada se presentaron excedente los cuales no se vendió y tuvo que ser recogido por el agricultor donde se esperaba que este producto descartado se redujera del pedido general a pesar de que el exceso de pedidos estaba del lado del minorista.

Las principales razones por las que la empresa eslovena Ponika dejó de operar fueron la combinación de los altos riesgos derivados de la mano de obra necesaria para cortar, filtrar y envasar el producto combinado con el precio promedio ganado de 8 EUR / kg de hierbas recién cortadas (empaquetado en paquetes de 100 g) que no proporcionan un rendimiento económico suficiente para cubrir la carga de trabajo adicional. Dado que la compañía era la única compañía eslovena en el mercado esloveno, los

gastrodistribuidores estaban dispuestos a tomar su producto sobre el producto importado, pero solo si los precios eran iguales a los precios de los competidores internacionales en el mercado. Con un alto porcentaje de hierbas frescas cortadas vendidas en el mercado europeo desde África del Norte, el alto costo de la mano de obra para las hierbas frescas cortadas producidas en acuaponía significaba que un sistema a pequeña escala no podía competir con los precios establecidos por el extensas granjas de hierbas recién cortadas en regiones más cálidas con menores costos de mano de obra, incluso cuando se incluyen los costos de transporte. Esto muestra que incluso cuando hay un nicho en un mercado local, a menudo hay razones específicas para que los productores locales no lo llenen en el caso de las hierbas recién cortadas en Eslovenia, este fue el alto costo de la mano de obra para un nicho de mercado demasiado pequeño.

18.6 EL LADO ACUÍCOLA DE LA ACUAPONIA COMERCIAL EN EUROPA

Comenzar un negocio en regiones de clima templado de Europa o América del Norte requiere una mayor inversión, ya que los sistemas deben mantenerse libres de heladas y requieren más energía eléctrica para la iluminación de la planta cuando funcionan durante todo el año.

En Europa, hay dos grandes potencias de producción hortícola, una en Westland / NL y el otro en Almería, en el sur de España. La concentración del mercado es alta y los márgenes de contribución son escasos. Como resultado, algunos productores de acuaponia presumen que en acuaponia el margen de contribución de la acuicultura es más interesante que el de la horticultura, por lo que probablemente algunos de los pocos operadores comerciales optaron por sobredimensionar la parte de la configuración de la acuicultura. Esto puede llevar a problemas técnicos debido a que se está produciendo una mayor cantidad de nutrientes que la requerida por el lado de la planta en el lado de la acuicultura. El exceso de agua del proceso debe ser descartado (Excursion Graber 2016 y Interview Echternacht 2018), cuestionando las afirmaciones de sostenibilidad de la acuaponia. Christian Echternacht de ECF informa que el margen de contribución de la acuicultura se ha sobreestimado en los primeros cálculos, lo que hace que el sobredimensionamiento de la acuicultura sea contraproducente para la rentabilidad general de la granja.

Se ha informado que numerosas especies de peces diferentes se producen en acuaponía comercial en Europa las mas populares para la producción de acuaponía son tilapia, pez gato africano, lobina negra, perca de jade, carpa y trucha. No se conoce actualmente una granja comercial de acuaponía que

esté criando peces europeos, pero los investigadores de la Universidad de Ciencias Aplicadas de South Westphalia (Morgenstern et al. 2017) encontraron que esta especie es adecuada para la producción en acuaponía.

La selección de especies de peces está influenciada por un gran número de diferentes parámetros específicos del proyecto, entre ellos son las necesidades del mercado, el precio y las opciones de distribución. Dentro de Europa, las regiones costeras tienen un mercado tradicionalmente fuerte para peces marinos con un conjunto diverso de especies y productos. Esto crea un desafío de comercialización para la producción acuícola de agua dulce. Ivo Haenen de Uit je Eigen Stad, Rotterdam, y Ragnheidur Thorarinsdottir de Samraekt Laugarmyri, Islandia, hablaron sobre este efecto en sus entrevistas. Los clientes de Rotterdam están acostumbrados a una oferta rica y diversa de productos de peces marinos, lo que dificulta la comercialización de tilapia de agua dulce y peces africanos; La tradición de las capturas silvestres marinas está tan arraigada en la cultura islandesa que el aspecto de la acuicultura de la acuaponía probablemente no se promoverá activamente en futuros proyectos de acuaponía.

La tilapia, es una de las especies de peces más utilizadas en acuaponía en los Estados Unidos (Love et al. 2015), es una especie que no se conoce comúnmente en Europa como muestran las experiencias de NerBreen en España, los productores europeos de acuaponía de tilapia se enfrentan a un doble desafío de comercialización: su atención de comercialización debe centrarse no solo en crear conciencia de los clientes sobre los beneficios de la producción de acuaponía, sino también sobre los beneficios de esta especie de peces relativamente desconocida.

La idoneidad de las especies seleccionadas para temperaturas elevadas del agua es otro factor importante ya que los peces son poiquilotérmicos; así su crecimiento y consecuentemente sus rendimientos de producción se aceleran con temperaturas más altas del agua. Pero las temperaturas elevadas del agua requieren más energía, que, dependiendo de la fuente de energía seleccionada para calentar el agua del proceso, está relacionada con costos operativos más altos. Por lo tanto, el efecto positivo de rendimientos más altos tiene que equilibrarse con los costos elevados para calentar el agua. Desde esta perspectiva, es deseable aprovechar el potencial del uso de calor residual de las plantas o industrias de energía adyacentes. Estas ubicaciones, por atractivas y sensatas que puedan ser desde un punto de vista económico y ecológico, pueden suponer un desafío para la comercialización general de la granja y sus productos. Los sitios de la industria generalmente no son idílicos y emocionalmente atractivos, y peor aún en el caso de plantas de aguas residuales anaeróbicas o industrias

similares, incluso podrían parecer repulsivos.

La influencia que las diferentes especies de peces tienen sobre el rendimiento y la calidad de las plantas aún no se ha investigado por completo. Knaus y Palm (2017) experimentó comparando el rendimiento de la planta en dos sistemas de acuaponía idénticos con parámetros de funcionamiento de cría de tilapia y carpa y descubrió que el rendimiento de la planta con tilapia era mejor que con carpa. Estos resultados muestran que efectivamente existe una diferencia en la interacción entre peces y plantas, pero estos no han sido investigados para una gama más amplia de especies. Además, aún no se ha investigado sistemáticamente el potencial para el policultivo de peces, donde dos o más especies diferentes de peces se crían en el mismo ciclo de acuicultura.

Uno de los factores operativos importantes para la selección de peces es la disponibilidad juvenil donde la mayoría de los productores comerciales de acuaponía compran juveniles de criaderos a excepción de la compañía Aqua4C en Bélgica que produce juveniles de perca de jade y usa estos peces en su sistema de acuaponía. Una recomendación común es seleccionar una especie con al menos dos proveedores conocidos con una capacidad significativamente mayor que la demanda proyectada para la granja de acuaponía. La razón detrás de esta recomendación es la mitigación de riesgos si el proveedor de juveniles experimenta problemas de producción y no puede entregar, entonces toda la producción de acuaponía está en riesgo.

Al igual que con el lado de la horticultura de la acuaponía, de manera similar, la parte de la acuicultura de la acuaponía enfrenta altos riesgos técnicos como la muerte del pescado debido a cortes de electricidad, según lo informado por Ponika de Eslovenia y NerBreen en España. Ivo Haenen, antiguo operador del sistema de acuaponía de la granja urbana "Uit je Eigen Stad" en Rotterdam, informa que el sistema de calefacción de la configuración inicial del sistema no estaba dimensionado adecuadamente. Un período inesperado de clima frío condujo a temperaturas de agua de proceso inferiores a las tolerables, lo que resultó en pérdidas en la parte de acuicultura de la operación. Este tipo de casos deben atribuirse al carácter pionero de las primeras operaciones comerciales de acuaponía en Europa los casos presentados ilustran por qué Lohrberg y su equipo clasificaron la acuaponía en la categoría "experimental" de los siete modelos comerciales identificados de la agricultura urbana (Lohrberg et al. 2016).

18.7 ACEPTACIÓN PÚBLICA Y ACEPTACIÓN DEL MERCADO

El futuro de la producción de acuaponía depende de la percepción pública y de la aceptación social asociada en importantes grupos de partes interesadas (Pakseresht et al. 2017) además de los posibles operadores de plantas de acuaponía, los actores a nivel mayorista y minorista, así como los gastro-distribuidores y la restauración colectiva son actores importantes en las cadenas de suministro.

Los consumidores son actores clave, ya que aportan el dinero a la cadena final; a pesar de que no tienen intereses económicos directos en la producción de acuaponia, así como los organismos políticos y administrativos son aspectos importantes a considerar. La necesidad de involucrar a las partes interesadas mencionadas se basa en estudios como Vogt et al. (2016), quienes muestran que las condiciones adecuadas son una base importante para el establecimiento de procesos innovadores en las cadenas de valor de los alimentos.

Para la acuaponia, todavía no se conocen las condiciones que promueven la difusión de esta tecnología. Aunque la tecnología utilizada en las instalaciones de acuaponia para la cría de peces de agua dulce en tanques también se utiliza en la acuicultura, hasta ahora esto es desconocido para una gran parte de la sociedad (Miličić et al. 2017). Con respecto al consumo de plantas de acuaponia, existe escepticismo con respecto a su contacto con el agua de peces (Miličić et al. 2017). Los estudios preliminares basados en una pequeña muestra con respecto a la aceptación de productos de acuaponia por parte de consumidores potenciales indican que los requisitos para los productos de las instalaciones de acuaponia van mucho más allá de lo que sugiere el comportamiento de compra anterior de los productos de pescado (Schröter et al.2017c). Basado en los resultados de Schröter et al. (2017), las primeras sugerencias sobre el efecto de la información en el proceso de aceptación están disponibles. Estos deben explorarse más a fondo mediante análisis perceptuales e de impacto de diversas variantes de información y presentación (por ejemplo, hechos textuales, imágenes, contenido de imágenes de palabras) y validación sobre la base de muestras representativas. Las investigaciones anteriores se han centrado en los ciudadanos en general y en los consumidores potenciales. Se carece por completo de estudios sobre la aceptación de otras partes interesadas importantes, como potenciales operadores de plantas, minoristas de alimentos y restauración pública, así como actores políticos y reguladores y el público en general.

Los primeros análisis de la respuesta de los consumidores sobre acuaponía

indican que los consumidores mostraron una actitud positiva hacia la acuaponía, siendo los problemas de seguridad alimentaria la principal preocupación del consumidor en Canadá (Savidov y Brooks 2004). Mergenthaler y Lorleberg (2016) en Alemania y Schröter et al. Llevaron a cabo un trabajo preliminar inicial sobre la disposición a pagar por productos de pescado de acuaponía; parte de estos estudios muestran una disposición relativamente alta a pagar por productos de pescado de acuaponía.

Sin embargo, estos resultados se basan en pequeñas muestras y no se pueden generalizar porque la disposición a pagar se ha compilado de un grupo objetivo especializado (ver Mergen- thaler y Lorleberg 2016) o en relación con la visita a un invernadero para plantas tropicales y subtropicales cultivadas. utilizando acuaponia (Schröter et al.2017a, b). De acuerdo con Tamin et al. (2015), los productos de acuaponia son productos ecológicos el cual se define como verde cuando incluye mejoras significativas en relación con el medio ambiente en comparación con un producto convencional en términos del proceso de producción, consumo y eliminación (Peattie 1992). Basado en la "teoría del comportamiento planificado (TPB)", Tamin et al (2015) han examinado la aceptación del consumidor de productos de acuaponia como productos verdes innovadores.

A partir de un conjunto de diferentes factores que influyen en el comportamiento (ventaja relativa, compatibilidad, norma subjetiva, conocimiento percibido, autoeficacia y confianza), se han identificado dos factores que tienen un impacto significativo: ventaja relativa y conocimiento percibido. La ventaja relativa describe hasta qué punto el comportamiento de compra está influenciado por las cualidades superiores del producto en comparación con los productos convencionales. Los productos de acuaponia son frescos y saludables, y esta percepción condujo a una ventaja de compra. El conocimiento percibido se relaciona con cuánto sabe el cliente sobre el método de producción cuanto más familiarizados estén los clientes con el método, más probable es que estén dispuestos a comprar productos acuapónicos.

No hubo correlación en la categoría de forma subjetiva, que se relaciona cuánto influye la decisión de compra en la opinión de amigos y familiares. Curiosamente, no hubo correlación para el factor de compatibilidad este factor se relaciona con cuánto es compatible la experiencia de compra del producto con el estilo de vida del cliente, Parece que el proceso de comercialización del producto en Malasia no es muy diferente para los productos de acuaponia y los productos convencionales. Entonces, si bien es cuestionable si los resultados de este estudio pueden transferirse de manera segura a los mercados europeos, un mensaje básico es que la educación

sobre el método de producción y la comunicación de los efectos beneficiosos con respecto a la frescura de los alimentos y los beneficios para el medio ambiente son actividades de marketing importantes. (Tamin et al. 2015).

Zugravu y col. (2016) estudiaron la compra de productos de acuaponia en Rumania donde los clientes fueron influenciados por amigos y familiares esta dimensión norma subjetiva, no mostró correlación en la encuesta de Malasia. La encuesta encuentra que los consumidores tienen una buena imagen general de acuaponía donde Piensan que los productos son buenos para su salud y que son frescos. El documento describe una discrepancia entre la percepción de peces de la acuicultura y la captura silvestre y la percepción de la acuicultura. Los minoristas piensan que los peces de cultivo pueden tener una imagen negativa, pero en realidad la acuicultura en sí misma no tiene una imagen pronunciada. Los minoristas perciben su falta como un riesgo de comercialización, pero se describe en el documento como un potencial para una marca positiva a través de una comunicación dirigida.

Como recomendación, el documento concluye que los minoristas deben basarse en la confianza que los consumidores mostraron al comprar estos productos de pescado y deben etiquetar a los peces de acuicultura como "saludables y frescos" (Zugravu et al. 2016). Curiosamente, tanto Tamin como Zugravu tuvieron un recuento de respuesta al cuestionario significativamente más alto de las mujeres (Tamin et al. 2015; Zugravu et al. 2016). Esto plantea la pregunta sobre las diferencias de género en el marketing de acuaponia. Aunque los estudios cuantitativos incluyen el género como una variable independiente en sus análisis, todavía no se han encontrado patrones sistemáticos y consistentes. Esto requiere más investigación que aborde explícitamente los aspectos de género.

Según Echternacht de ECF en Alemania, cuyo principal modelo de negocios es establecer sistemas de acuaponia, el marketing es el componente que sus clientes potenciales suelen subestimar. ECF Farmsystems se basa en esta experiencia y encuesta a sus clientes potenciales para sus objetivos de comercialización y distribución. Si tienen un negocio existente con producción real y canales de comercialización establecidos, entonces el cliente es muy interesante. Los clientes idealistas que piensan que los productos se comercializarán por sí mismos son tratados con precaución.

Dependiendo del grupo objetivo previsto, diferentes escalas de unidades de producción pueden ser favorables. Si bien algunos segmentos de consumidores prefieren la producción a pequeña escala posiblemente

vinculada a distancias cortas de transporte y la producción local, puede haber otros segmentos de consumidores más interesados en la eficiencia de los recursos y la producción de bajo costo que se pueden realizar en unidades de producción bastante grandes vinculadas a energía residual y fuentes de calor residual. Los resultados de Rostock muestran (Palm et al.2018) que los sistemas a pequeña escala con tecnología simple pueden tener sentido. Sistemas de mediana escala requieren todo el mantenimiento y los gastos operativos de los sistemas a gran escala, pero no tienen el beneficio y la producción de los sistemas a gran escala. Las conclusiones de su experiencia muestran que debe ser pequeño y alcanzar precios altos en los mercados locales o ir a sistemas a mayor escala con la explotación respectiva de economías de escala que permitan reducciones de precios. Bioaqua, del Reino Unido, es una de las raras compañías europeas de acuaponia que decidió seguir el camino de la producción a pequeña escala con sistemas más simples y baratos y proporcionar el valor agregado a través de la restauración y la búsqueda de productos especializados para la distribución directa a restaurantes.

Puede haber otros segmentos de consumidores que muestren altas preferencias por el bienestar de los peces y, por lo tanto, tengan que ser atacados con peces de las unidades de producción que se ajusten a estos ideales. Como Miličić et al. (2017) muestran que los consumidores pueden expresar aversiones inesperadas, como los veganos que expresan actitudes altamente negativas hacia la acuaponia. Como se señala en la literatura, algunas facetas de la acuaponia pueden despertar una alta implicación emocional, como la estética del sistema de acuaponia (Pollard et al. 2017), el nivel de mecanización (Specht et al. 2016), la producción de cultivos sin suelo (Specht und Sanyé-Mengual 2017), bienestar de los peces (Korn et al. 2014), preocupaciones sobre los riesgos para la salud debido al sistema de recirculación de agua (Specht und Sanyé-Mengual 2017), o emociones negativas que bordean el asco, porque el excremento de pescado se usa como fertilizante para hortalizas (Miličić et al.2017).

En este contexto, la percepción y evaluación de la acuaponia y sus productos pueden basarse en procesos inconscientes en lugar de una cuidadosa consideración de argumentos lógicos. Para algunos segmentos de consumidores, las plantas de acuaponia son innovadoras e interesantes, y para otros el vínculo entre el pescado y la producción de plantas puede no ser aceptable. Esto también lo muestra ECF en Berlín: ECF decidió modificar su estrategia inicial de producción y comercialización. Al principio, intentaron producir una amplia gama de cultivos y comercializarlos directamente en el lugar. Sin embargo, según Christian Echternacht (entrevista de febrero de 2018), el esfuerzo de marketing es simplemente demasiado

grande. Según su experiencia, los clientes no desean visitar demasiadas ubicaciones con solo unos pocos productos en un mismo lugar. Por lo tanto, ECF decidió producir solo un cultivo, la albahaca, que se comercializa a través de una cadena de supermercados. Su experiencia, así como revisiones de literatura más exhaustivas, muestran que, dependiendo del grado de cumplimiento de las expectativas del cliente, se pueden lograr diferentes niveles de disposición a pagar y, por lo tanto, los precios de mercado alcanzables son muy específicos del contexto.

De manera similar, la empresa eslovena Ponika intentó primero la distribución directa de sus hierbas recién cortadas a restaurantes en Liubliana. Pero, al igual que con los clientes individuales, los restaurantes también se mostraron reacios a ordenar directamente, incluso si el precio era más bajo. Para los gerentes de restaurantes, el tiempo y el esfuerzo necesarios para ordenar productos individuales era un precio demasiado alto para pagar, y no estaban dispuestos a ordenar directamente. Prefirieron quedarse dentro de sus propios gastro-distribuidores, por lo que podían hacer su compra general en un solo pedido.

Las experiencias de ECF de Berlín y Ponika de Eslovenia descritas anteriormente están en línea con las experiencias anteriores en la comercialización de productos alimenticios orgánicos. Vender estos productos localmente mediante distribución directa solo será posible para una pequeña parte de los productos. A pesar de que muchos consumidores quieren comprar productos locales y / u orgánicos productos, a menudo quieren hacer sus compras lo más convenientemente posible. Esto significa que las compras tienen que ser eficientes para ajustarse a su horario diario. Como lo muestra Hjelmar (2011) para productos orgánicos, la disponibilidad de estos productos alimenticios es importante para los consumidores porque la mayoría son pragmáticos. No quieren ir a varias tiendas para obtener lo que quieren. Quieren comprar sus productos convenientemente en un supermercado cercano y si el supermercado no tiene una amplia selección de productos orgánicos, muchos consumidores terminan comprando productos convencionales (Chryssohoidis y Krystallis 2005). Se pueden describir experiencias similares para los consumidores que compran productos regionales en Alemania (Schuetz et al.2018) Lo mismo presumiblemente se aplicará a los productos cultivados con acuaponia. Si estos productos no estarán disponibles en los supermercados, la acuaponía probablemente seguirá siendo un nicho de producción.

La producción de hortalizas en interiores puede requerir menos o ninguna aplicación de pesticidas, pero el cultivo sin suelo de plantas no es una opción en la legislación actual sobre agricultura orgánica (cf. Cap. 19 de

este libro). Por lo tanto, la acuaponía en su sentido más estricto no proporcionará las características necesarias para ser elegible para la certificación como producción orgánica y no se permitirán etiquetas orgánicas en los productos de acuaponía. Por lo tanto, o los encargados de formular políticas deben ser presionados para inducir cambios en la legislación orgánica, o los compradores orgánicos deben ser educados en este tema bastante complicado. Este aspecto también es importante en el sentido de que los productos orgánicos clasificados usualmente alcanzan precios de mercado más altos que los productos convencionales, y tal certificación haría que los sistemas de acuaponía sean económicamente más viables. Si los productos cultivados en acuaponia se pueden vender a los mismos precios que los productos orgánicos, bajo ciertas condiciones, el período de recuperación de los sistemas de acuaponia se puede reducir a menos de la mitad (Quagrainie et al.2018).

Además del marketing de productos, los servicios relacionados con la producción de acuaponia pueden generar flujos de ingresos adicionales. El alto nivel de innovación de la acuaponia genera interés, que pueden explotarse en diferentes ofertas de servicios que incluyen visitas pagas granjas acuaponia, talleres y servicios de consultoría en torno al establecimiento de nuevos sistemas de acuaponía. Hay varios ejemplos de instalaciones de acuaponia que se aventuran en esta dirección:

- ECF brinda asesoría comercial para el establecimiento de nuevos sistemas de acuaponia.
- UrbanFarmers, Den Hague, ofreció visitas pagas a las instalaciones, así como a la ubicación de un evento. (Nota: el proyecto ya ha cesado).

Además de ajustar los sistemas de producción a las expectativas del cliente en un concepto integral de marketing, las estrategias de comunicación también juegan un papel importante. Hasta ahora, el conocimiento sobre acuaponia en la sociedad es débil (Miličić et al. 2017; Pollard et al. 2017). Al adquirir información, las diferentes variantes de información y de representación de información influirán significativamente en la percepción pública de esta tecnología innovadora. Para satisfacer las demandas de información de los interesados, se pueden utilizar diferentes canales de comunicación y diferentes materiales de información.

Se requieren estrategias de diversificación que incluyan talleres, guías para visitantes y otros servicios. Hay oportunidades para ideas de negocios nuevas y alternativas. Los ejemplos de enfoques innovadores de comunicación de algunos operadores comerciales de acuaponia muestran los desafíos específicos asociados con la acuaponia:

1. ECF, Berlín: elección de la variedad roja de tilapia. Marca como "Rosébarsch" al comienzo de las ventas. Mientras tanto, inspirado por la marca de un cliente en un restaurante, ECF cambió su nombre a "Hauptstadtbarsch" (perca de la capital) mientras tanto (Entrevista Echternacht 2018). De este modo, la marca regional se coloca en primer plano en la comunicación en lugar de la calidad inherente del producto orientada al color de la carne de pescado.

2. Aqua4C, Bélgica: introdujeron la perca de jade de Oceanía en el mercado europeo. Aqua4C desarrolló una marca como "Omega Baars", adoptando así un nuevo enfoque alimentario. Implícitamente comercializan las especies de peces regionalmente desconocidas como saludables mientras evitan cuidadosamente hacer declaraciones de propiedades saludables.

3. Ponika, Eslovenia: La comercialización de productos de acuaponia ha sido difícil.La situación era complicada ya que la granja de acuaponia estaba ubicada lejos del mercado, que estaba demasiado lejos para una visita rápida y tampoco había otra atracción cerca. Llegaron a la conclusión de que sin la posibilidad de visitas, sería difícil asegurar a la granja fuentes de ingresos adicionales o comercialización directamente a los consumidores. En su enfoque de marketing, primero se dirigieron a los gastro-distribuidores con un enfoque en la calidad y la producción local a un precio competitivo. No se atrevieron a apuntar a consumidores individuales a través de cadenas de supermercados debido a que tenían un sistema demasiado pequeño y la incapacidad posterior para asegurar volúmenes de producción constantes y lo suficientemente grandes. Por lo tanto, vendieron hierbas recién cortadas directamente a los gastro-distribuidores, por lo que el precio y la producción local desempeñaron el papel más importante. Su experiencia demostró que a los gastrodistribuidores les gustó la historia de la producción innovadora de alimentos y les gustó ayudar a los jóvenes en su nueva empresa.

Por lo tanto, fueron de apoyo en el sentido de que adoptaron su proceso de compra recogiendo el producto cuando estaba disponible y ordenando a vendedores extranjeros cuando no lo estaba. En general, sin embargo, no estaban muy interesados en el carácter de sostenibilidad de la acuaponia; en otras palabras, no les importaba cómo se producían las hierbas recién cortadas, sino que se producían localmente y tenían un empaque atractivo (1 kg y 1 / 2 kg) donde se enfatizó el carácter local de la producción. Por lo tanto, en su experiencia con los minoristas, la historia de una empresa de jóvenes innovadores funcionó mejor. A los clientes a nivel minorista, además, no les gustaba la conexión con la hidroponía, ya que mezclaban

acuaponía e hidroponía. En Eslovenia, los clientes desconfían de la hidroponía, y la compañía Ponika necesitaba enfrentar el desafío de cambiar la percepción del consumidor de la hidroponía, que tiene una imagen negativa como "antinatural", en acuaponia y crear una imagen positiva de la acuaponia. Además, la selección de hierbas recién cortadas para los consumidores individuales resultó ser problemática, ya que los beneficios para la salud no eran lo suficientemente importantes en las hierbas recién cortadas, ya que las personas simplemente no comen tanto como para preocuparse por, por ejemplo, los pesticidas. -producción libre.

4. **NerBreen, España:** NerBreen se centra más en el elemento de acuicultura de su negocio, ya que el 70% de su modelo de negocio representa los ingresos de la venta de pescado. Sin embargo, proporcionan una amplia comercialización tanto del pescado como de las verduras. En ambos casos, intentan apuntar a los consumidores individuales a través de cadenas minoristas, preferiblemente aquellos minoristas que se dirigen a los consumidores que están dispuestos a pagar el precio premium por una calidad local más alta, con el objetivo de obtener aproximadamente un 20% más de precios que el promedio. Enfrentan desafíos en la comercialización de vegetales y tilapia. Con las verduras se centraron en el ajo fresco y los tomates cherry porque podrían alcanzar precios más altos debido a la menor competencia en esas áreas. Sus esfuerzos de marketing incluyen envases bien diseñados con hojas, por lo que explican los beneficios de sostenibilidad de la acuaponía. Aquí, se centran tanto en asegurar una calidad superior como en agregar una historia adicional a su marca. Cuando venden tilapia, enfrentan un desafío mayor.

   Actualmente, los consumidores españoles tienen una percepción negativa de la tilapia, ya que la confunden con el panga, que se considera un pescado barato y de baja calidad, o piensan que se importa de la acuicultura intensiva del Lejano Oriente y, de manera similar, se supone que es de menor calidad. Dentro de sus esfuerzos de comercialización, NerBreen, por lo tanto, necesitaba cambiar esta imagen negativa y se está centrando en proporcionar información sobre el hecho de que esta tilapia se produce localmente, por lo que tanto la calidad del agua como la calidad del alimento para peces son de alta asimilación, lo que resulta en una alta calidad producto de pescado.

5. **Agricultores urbanos, Países Bajos:** en un esfuerzo por generar fuente de ingresos adicionales, establecieron visitas a las instalaciones de producción de acuaponía. Sin embargo, actualmente es cuestionable si el negocio de los visitantes es económicamente sostenible. Surgen pregun-

tas sobre si el flujo de visitantes disminuirá cuando la exageración en torno a la acuaponía se asiente o una vez que "todos" ya lo hayan visto. Además de los visitantes, ya se aprovechan otras fuentes de ingresos: Rooftop Farms ofrece talleres de jardinería. (Cabe señalar que los agricultores urbanos de La Haya dejaron de comerciar).

Los medios impresos y las redes sociales son adecuados para la educación pública, así como talleres temáticos, visitas guiadas a las granjas y degustaciones de productos de acuaponia (Miličić et al.2017) Sin embargo, la provisión de información tendrá éxito solo si satisface las necesidades de información del público objetivo. Las partes interesadas, como los representantes de los gobiernos nacionales, las diferentes asociaciones (por ejemplo, las asociaciones de agricultura ecológica), los operadores de plantas o los fabricantes de plantas probablemente estén más interesados en obtener información objetiva completa. Para la información de los ciudadanos y los consumidores, centrarse en la emoción y el entretenimiento podría ser más atractivo. Con respecto a este público objetivo, las imágenes combinadas con mensajes de texto concisos son particularmente adecuadas para la transferencia de información. Para estos interesados más allá de la percepción consciente de la información y el procesamiento de la información, también los efectos inconscientes juegan un papel importante. Diferentes marcos, que significan diferentes formatos de presentación de la misma información, pueden influir en el comportamiento del destinatario de diferentes maneras (Levin et al. 1998). Para una mejor comprensión de los procesos inconscientes que pueden influir en el comportamiento de las partes interesadas, los métodos de investigación neuroeconómica en asociación con los métodos tradicionales de investigación de mercado son herramientas útiles. El seguimiento ocular permite responder preguntas sobre la percepción visual de manera objetiva. Combinado con otros métodos empíricos de investigación en comunicación, especialmente encuestas cualitativas y cuantitativas, es posible realizar análisis complejos de percepción e impacto. Como muestra un estudio piloto de Schröter y Mergenthaler (2018a, b), las actitudes hacia los diferentes sistemas de acuaponia están relacionadas con el comportamiento de la mirada de los participantes del estudio mientras ven material informativo sobre acuaponia.

La importancia de un diseño cuidadoso y orientado al grupo de material de información sobre acuaponía y las posibles soluciones son que la planificación de la producción tiene que acomodar y agregar las fuentes de ingresos adicionales o la comercialización directa mediante el cultivo de una gran variedad de cultivos diferentes, lo que complica aún más el proceso de producción sin embargo, como muestra ECF en Alemania, comenzaron

con una variedad de verduras, pero decidieron centrarse solo en la albahaca y venderla a través de una gran cadena minorista. Otra posibilidad es construir alianzas estratégicas con otros productores regionales para lograr estrategias innovadoras de comercialización y distribución. En general, sin embargo, podemos concluir que el aspecto comercial de la acuaponia comercial es uno de sus desafíos más importantes y en el que las granjas de acuaponia europeas tuvieron que sufrir una serie de cambios para intentar encontrar el producto adecuado en el mercado. Sin embargo, queda por ver si se ha encontrado este ajuste del mercado de productos y qué tan estable se mantendrá.

18.8 CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Como se discutió en este capítulo, las evaluaciones económicas de los sistemas acuaponicos siguen siendo una tarea muy compleja y difícil en la actualidad. Aunque la acuaponia a veces se presenta como un método económicamente superior de producción de alimentos, no hay evidencia de tales declaraciones generalizadas. Hasta ahora, casi no hay datos confiables disponibles para una evaluación económica integral de acuaponia. Esto se debe en parte a que no existe "un sistema de acuaponia", sino que existe una variedad de sistemas diferentes que operan en diferentes lugares en diferentes condiciones. Por ejemplo, factores tales como las condiciones climáticas, que afectan principalmente el consumo de energía de los sistemas, los niveles salariales, la carga de trabajo requerida para operar los sistemas y las condiciones legales deben considerarse en el lado del costo. Por el lado de los ingresos, factores como la combinación de planta de pescado elegida con los precios específicos de sus productos, la opción de administrar los sistemas como producción orgánica, así como la aceptación pública a largo plazo de los sistemas de acuaponia y sus productos tienen un impacto en el evaluación económica No menos importante, la evaluación económica de la acuaponia en su sentido más estricto debe hacerse en comparación con los sistemas de recirculación de la acuicultura y los sistemas hidropónicos como sistemas independientes.

La acuaponia constituye un gran desafío de comunicación como algo bastante desconocido sistema de producción de alimentos con altos niveles de innovación y en la mayoría de los casos con altos insumos tecnológicos. Como el consumo de alimentos en las sociedades avanzadas está cada vez más vinculado a alguna forma de naturalidad, cabe esperar grandes desafíos en la comunicación de los sistemas y productos de acuaponia. La evidencia limitada disponible sugiere que este desafío puede manejarse bajo ciertas condiciones marco pero Esto requiere mucho tiempo, así como aportes financieros y creativos. Hay que reconocer que los altos precios

reportados para los productos de acuaponia solo tienen un costo considerable para el establecimiento de la marca. Como cualquier viabilidad económica de los sistemas de acuaponia dependerá críticamente de los precios alcanzables, se necesita más investigación para comprender los diferentes determinantes de la disposición de los clientes a pagar por los productos de acuaponia. Las decisiones de ubicación para la agricultura de acuaponia son un determinante clave de la viabilidad económica, ya que muchos factores de producción relacionados con la producción de acuaponia no son flexibles en términos de espacio. Esto se relaciona particularmente con la tierra.

La acuaponía como sistema de producción eficiente en la tierra solo puede contar con esta ventaja en las regiones con escasez de tierra. Comparativamente, las áreas rurales con precios relativamente bajos de la tierra, por lo tanto, no pueden generar incentivos suficientes a menos que haya otras ventajas específicas del sitio, por ejemplo, el suministro de energía residual de las plantas de biogás. Aunque es eficiente en términos de tierra en general, la acuaponia en contextos urbanos todavía compite por recursos de tierra altamente limitados. En los mercados funcionales, la tierra se asignaría a aquellas actividades con los mayores beneficios por unidad de tierra y es muy cuestionable si la acuaponía podrá competir con actividades industriales o de servicios muy eficientes en contextos urbanos. Por lo tanto, la acuaponia parece encajar solo en áreas urbanas que proporcionan a la acuaponia una ventaja competitiva sobre las actividades potenciales competidoras.

Extendiendo la definición de acuaponia e incluyendo el cultivo de acuaponia según lo introducido por Palm et al. (2018) podría alinear la acuaponía mucho más cerca de los análisis tradicionales de agricultura económica. Esta definición más amplia de acuaponia se refiere al agua de proceso que se utiliza para la fertilización combinada con riego en campos. Con esta interpretación más amplia de acuaponia, se hace posible producir alimentos básicos en los sistemas de producción acuaponia. Dado que la capacidad de absorción de nutrientes del área agrícola puede ser limitada en algunas regiones, esta definición posiciona implícitamente a la acuaponia como competidora de la producción de cerdos, carne y aves de corral. Dado que la acuicultura utiliza menos recursos que los cerdos, la carne de res y las aves de corral con respecto a la producción final, esta podría ser una opción viable.

En los análisis económicos tradicionales de las granjas, existe una fuerte separación tecnológica y conceptual de la producción animal y vegetal. Con una menor interacción tecnológica en la agricultura de acuaponia en

comparación con la acuaponía en sus sentidos más estrictos, también habrá una evaluación económica menos compleja ya que los dos sistemas de producción de peces y plantas se pueden modelar por separado. Para vincular los sistemas económicamente, los precios internos del sistema tendrían que determinarse, precios de los nutrientes traídos de la producción de peces a los campos de producción de plantas.

Otro problema son los precios obtenidos para los productos finales de la agricultura de acuaponía. Faltan por completo pruebas de precios alcanzables de este tipo de sistemas de producción, lo que restringe estimaciones confiables sobre la viabilidad económica hasta el momento. Con una separación más fuerte de la producción de peces y plantas, podría ser factible utilizar los precios de los productos de acuicultura convencionales y los precios convencionales de la producción de plantas. Esto supondría que no hay una prima de precio para la agricultura de acuaponía. Para probar si este es realmente el caso, se deben implementar experimentos de precios combinados con diferentes herramientas de comunicación.

Desde la perspectiva de las comunicaciones, está la cuestión de la percepción de la agricultura acuaponía como superior a los enfoques agrícolas tradicionales. A primera vista, la agricultura de acuaponía podría parecerse a la cría de ganado convencional utilizando solo un tipo diferente de animal. Los esfuerzos de comunicación deberán centrarse en los niveles más altos de eficiencia de la acuicultura en comparación con otros tipos de producción ganadera. La publicidad de productos vegetales de la agricultura de acuaponía como superior a los productos de la producción convencional de plantas puede ser un desafío y requiere análisis más profundos.

Sin embargo, una ventaja con respecto a la comunicación podría ser el hecho de que una separación más fuerte de los peces y la producción de plantas en la acuicultura podría facilitar la certificación orgánica. Se espera que el etiquetado orgánico sea una ventaja adicional en los esfuerzos de comunicación relacionados con la acuaponia. (Debe tenerse en cuenta que en el Reino Unido, al menos, la certificación orgánica está vinculada al cultivo de productos en el suelo y, por lo tanto, puede ser necesario identificar un tipo diferente y especial de certificación. Para obtener más información sobre el tema de la acuaponía y la certificación orgánica, consulte el Capítulo 19).

Finalmente, es importante tener en cuenta que las empresas europeas de acuaponía entrevistadas, incluso aquellas que abandonaron su cultivo comercial de acuaponía, tienen esperanzas para el futuro de la acuaponía. Optaron por la acuaponía debido a su potencial de sostenibilidad y todavía

ven ese potencial. Sin embargo, reconocen que la adopción de acuaponia es un proceso gradual y a largo plazo, que no puede repetirse simplemente en diferentes lugares sino que debe adaptarse al entorno local. Como tal, la acuaponia sigue siendo una de las tecnologías potencialmente sostenibles del futuro, una de la que (todavía) no se puede decir que pueda competir adecuadamente en el mercado con sus competidores, pero que seguirá necesitando más apoyo público y otra. cuya adopción está determinada no solo por sus ventajas comerciales, sino mucho más por la determinación pública y la buena voluntad. Como se indica en el cap. 16 de esta publicación, haciendo la pregunta "¿bajo qué circunstancias puede la acuaponia superar a los métodos tradicionales de producción de alimentos a gran escala?" No es lo mismo que preguntar "en qué medida la acuaponía puede satisfacer las demandas de sostenibilidad y seguridad alimentaria de nuestra época".

REFERENCIAS

ACAC Association of Commercial Aquaponics Companies (2018) 10 Dec 2018. https://euaquaponicshub.wordpress.com/association-of-commercial-aquaponics-companies-acac/ Adler PR, Harper JK, Wade EM (2000) Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. Int J Recirculating Aquac 1(15):15–34

Baker AAC (2010) Preliminary development and evaluation of an aquaponic system for the American Insular Pacific. [Honolulu]:[University of Hawaii at Manoa], [December 2010] Bailey DS, Ferrarezi RS (2017) Valuation of vegetable crops produced in the UVI Commercial Aquaponic System. Aquacult Rep 7:77–82

Bailey DS, Rakocy JE, Cole WM, Shultz KA, St Croix U (1997) Economic analysis of a commercial-scale aquaponic system for the production of tilapia and lettuce. In: Tilapia aquaculture: proceedings of the fourth international symposium on Tilapia in aquaculture, Orlando, Florida, pp 603–612

BORISplus (2018) Amtliche Informationen zum Immobilienmarkt in NRW. 16 Mar 2018. https://www.boris.nrw.de/borisplus/?lang¼en

Bosma R (2016) The economic feasibility of aquaponics: a post-hoc cost-benefit analysis of investing in a fish vegetable farm near Dumaguete, Philippines. 11th Asian Fisheries and Aquaculture Forum, Bangkok, 2016-8-6/2016-8-6, 10 Dec 2018. http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/512805

Bosma RH, Lacambra L, Landstra Y, Perini C, Poulie J, Schwaner MJ, Yin Y (2017) The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. Aquacult Eng 78:146–154.

https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.07.002
Bunyaviroch C (2013) Aquaponic systems in Puerto Rico: assessing their economic viability. PhD dissertation, Worcester Polytechnic Institute
Chryssohoidis GM, Krystallis A (2005) Organic consumers' personal values research: testing and validating the list of values (LOV) scale and implementing a value-based segmentation task. Food Qual Pref 16:585–599 Destatis (2015) Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/. Accessed 10 Nov 2015
Engle CR (2015) Economics of aquaponics. SRAC Publication – Southern Regional Aquaculture Center. No.5006. 15 Feb 2018 https://srac.tamu.edu/serveFactSheet/282
Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199
Goddek S, Espinal C, Delaide B, Jijakli M, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman K (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8:303. https://doi.org/10.3390/w8070303
Graber A, Junge R (2009) Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.048 Hjelmar U (2011) Consumers' purchase of organic food products. A matter of convenience and reflexive practices. Appetite 56:336–334
IndustryARC (2012) Aquaponics market by equipment (grow lights, pumps, valves, greenhouse, water heaters, aeration systems); Components (rearing tanks, settling basins, sump, biofilter, hydroponics); End user (Commercial, home, community) Forecast (2013–2018), 24 Mar 2018. https://www.slideshare.net/rajesh193k/aquaponics-market-size-and-forecast-2018
IndustryARC (2017) Aquaponics market by equipment (Grow lights, pumps, valves, greenhouse, water heaters, aeration systems); Components (Rearing tanks, settling basins, sump, biofilter, hydroponics); End user (Commercial, home, community) – Forecast (2015–2021), 1 Feb 2018. http://industryarc.com/Report/22/global-commercial-aquaponics-market.html
Karimanzira D, Keesman KJ, Kloas W, Baganz D, Rauschenbach T (2016) Dynamic modeling of the INAPRO aquaponic system. Aquacult Eng 75:29–45. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.10.004
Knaus U, Palm HW (2017) Effects of the fish species choice on vegetables in aquaponics under spring-summer conditions in northern Germany (Mecklenburg Western Pomerania). Aquacul- ture 473:62–73. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.020

Korn A, Feucht Y, Zander K, Janssen M, Hamm U (2014): Entwicklung einer Kommunikationsstrategie für nachhaltige Aquakulturprodukte. 29 Oct 2017. http://orgprints. org/28279/1/28279-11NA040-066-uni-kassel-ti-2014-fischlabelling.pdf

Körner O, Holst N (2017) An open-source greenhouse modelling platform. Acta Horticult 241–248. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1154.32

Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. Acta Horticult:309–316. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.37

KTBL (2009) Gartenbau: Produktionsverfahren planen und kalkulieren. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. KTBL

Laidlaw J (2013) From Innovation to sustainability: Surviving five years as an urban aquaponics social enterprise. 13 Feb 2018. http://citiesprogramme.org/wp-content/uploads/2016/08/laidlaw_from_innovation_to-sustainability-web.pdf

Levin IP, Schneider SL, Gaeth GJ (1998) All frames are not created equal: a typology and critical analysis of framing effects. Organ Behav Hum Decis Process 76(2):149–188

Lewis WM, Yopp JH, Schramm HL, Brandenburg AM (1978) Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. Trans Am Fish Soc 107:92–99. https://doi. org/10.1577/1548-8659(1978)107

Leyer M, Hüttel S (2017) Performance analysis with DEA, process mining and business process simulation on a livestock process. In: Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists, 13 Dec 2018. https://pdfs.semanticscholar.org/2d2d/ef068539537127feed0080655cdba4266ce6.pdf

Lohrberg F, Lička L, Scazzosi L, Timpe A (eds) (2016) Urban agriculture Europe. Jovis, Berlin

Love DC, Fry JP et al (2014) An international survey of aquaponics practitioners. PLoS One 9(7). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662

Love DC, Fry JP, Li X, Hill ES, Genello L, Semmens K, Thompson RE (2015) Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. Aquaculture 435:67–74. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023

Mackowiak C, Owens L, Hinkle C, Prince R (1989) Continuous hydroponic wheat production using a recirculating system. NASA Technical Memorandum TM 102784. 3 Mar 2018. https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900009537.pdf

Medina M, Jayachandran K, Bhat MG, Deoraj A (2015) Assessing plant growth, water quality and economic effects from application of a plant-based aquafeed in a recirculating aquaponic system. Aquacult Intl

24(1):415–427. https://doi.org/10.1007/s10499-015-9934-3
Mergenthaler M, Lorleberg W (2016) Voruntersuchung zur Zahlungsbereitschaft für frischen und geräucherten europäischen Wels aus einer Aquaponik-Pilotanlage. In: Notizen aus der Forschung, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest,14/2016
Miličić V, Thorarinsdottir R, Santos M, Hančič M (2017) Commercial aquaponics approaching the European market: to consumers' perceptions of aquaponics products in Europe. Water 9:80. https://doi.org/10.3390/w9020080
Morgenstern R, Lorleberg W, Biernatzki R, Boelhauve M, Braun, J., Haberlah-Korr, V., 2017. Pilotstudie "Nachhaltige Aquaponik-Erzeugung für Nordrhein-Westfalen." Fachhochschule
Südwestfalen, Soest. ISBN:978-3-940956-66-8
Naegel LCA (1977) Combined production of fish and plants in recirculating water. Aquaculture 10:17–24. https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90029-1
Orsini F, Dubbeling M, de Zeeuw H, Gianquinto G (2017) Rooftop urban agriculture. Springer Pakseresht A, McFadden BR, Lagerkvist CJ (2017) Consumer acceptance of food biotechnology based on policy context and upstream acceptance: evidence from an artefactual field experiment. Eur Rev Agricult Econom 44:757–780. https://doi.org/10.1093/erae/jbx016
Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Haïssam Jijakli M, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. Aquacult Intl. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z
Peattie K (1992) Green marketing: The M and E handbook series. Pitman Longman Group, London Petrea SM, Coadă MT, Cristea V, Dediu L, Cristea D, Rahoveanu AT, Zugravu AG, Rahoveanu MMT, Mocuta DN (2016) A comparative cost – effectiveness analysis in different tested aquaponic systems. Agricult Agricult Sci Proc 10:555–565. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.034
Pollard G, Ward J, Koth B (2017) Aquaponics in urban agriculture: social acceptance and urban food planning. Horticulturae 3:39. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020039
Quagrainie KK, Flores RMV, Kim H-J, McClain V (2018) Economic analysis of aquaponics and hydroponics production in the U.S. Midwest. J Appl Aquacult 30:1–14
Savidov N, Brooks A (2004) Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in Alberta. Crop Diversification Centre South, Alberta Agriculture, Food and Rural Development
Schröter I, Mergenthaler M (2018a) Eye-tracking als neuroökonomische

Methode zur Erfassung von Wahrnehmungsprozessen von Informationen über Aquaponik. Notizen aus der Forschung Nr. 2/2018. Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest

Schröter I, Mergenthaler M (2018b) Technik oder Natur: Wahrnehmung und Bewertung von Aquaponik-Varianten. Notizen aus der Forschung Nr. 1/2018. Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest

Schröter I, Hüppe J-H, Lorleberg W, Mergenthaler M (2017a) Einflussfaktoren auf die Zahlungsbereitschaft für Fisch nach dem Besuch einer Aquaponikanlage. In: Notizen aus der Forschung, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest.71

Schröter I, Hüppe J-H, Lorleberg W, Mergenthaler M (2017b) Kenntnisse über Aquaponik und Zahlungsbereitschaft für Fisch nach dem Besuch einer Polykulturanlage mit Aquaponik. In: Notizen aus der Forschung, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest. 70

Schröter I, Lorleberg W, Mergenthaler M (2017c) Erwartungen potentieller Konsumenten an Fischprodukte aus Aquaponik in einer Sondierungsstichprobe. In: Notizen aus der Forschung, Fachbereich Agrarwirtschaft, Soest,69

Schuetz K, Voigt L, Mergenthaler M (2018) Regionale Lebensmittel zwischen Anspruch und Wirklichkeit: Verbrauchererwartungen, Begriffs- und Qualitätsverständnisse regionaler Vermarktungsinitiativen und verbraucherpolitische Implikationen. KVF working paper

Smeets PJ (2010) Expedition Agroparks; Research by Design Into Sustainable Development and Agriculture in the Network Society. Wageningen Academic Publications

Smil V (2008) Energy in nature and society: general energetics of complex systems. MIT Press, Cambridge, MA

Specht K, Sanyé-Mengual E (2017) Risks in urban rooftop agriculture: Assessing stakeholders' perceptions to ensure efficient policymaking. Environ Sci Policy 69:13–21. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.001

Specht K, Weith T, Swoboda K, Siebert R (2016) Socially acceptable urban agriculture businesses. Agron Sustain Dev 36(1):17. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0355-0

Tamin M, Harun A, Estim A, Saufie S, Obong S (2015) Consumer Acceptance towards Aquaponic Products. IOSR J Bus Manage (IOSR-JBM) 17:49–64. https://doi.org/10.9790/487X-17824964

Thorarinsdottir RI (2015) Aquaponics guidelines, University of Iceland: Iceland. Available online: http://skemman.is/en/stream/get/1946/23343/52997/1/Guidelines_Aquaponics_20151112.pdf

Tokunaga K, Tamaru C, Ako H, Leung P (2015) Economics of small-scale

commercial aquaponics in Hawaii. J World Aquacult Soc 46:20–32
Villarroel (2017) Map. Aquaponics Map (COST FA1305). https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?ll¼35.35294037658608%2C0.45745135072172616&z¼4&mid¼1bjUUbCtUfE_BCgaAf7AbmxyCpT0. Accessed 8 Sep 2018
Villarroel M, Junge R, Komives T, König B, Plaza I, Bittsánszky A, Joly A (2016) Survey of Aquaponics in Europe. Water 8:468. https://doi.org/10.3390/w8100468
Vogt L, Schütz K, Mergenthaler M, (2016) Regionalisierung von Lieferketten in der Ernährungswirtschaft–Herausforderungen und Ansatzpunkte
Zugravu AG, Rahoveanu MMT, Rahoveanu AT, Khalel MS, Ibrahim MAR (2016) The perception of aquaponics products in Romania. Risk Contempo Econom 3:525–530

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 19

ACUAPONÍA: EL PATITO FEO EN LA REGULACIÓN ORGÁNICA

Paul Rye Kledal, Bettina König, and Daniel Matulić

Capítulo 19

ACUAPONÍA: EL PATITO FEO EN LA REGULACIÓN ORGÁNICA

Paul Rye Kledal, Bettina König, and Daniel Matulić

Resumen

Debido a la naturaleza cíclica o sistémica de la producción de acuaponia y orgánica, la certificación orgánica parece ser un paso natural para que participe un investigador, diseñador de sistemas o productor de acuaponia comercial. Sin embargo, los principios y justificaciones subyacentes de la acuaponía y la orgánica. la producción difiere considerablemente entre una comprensión tecnológica y una basada en el suelo, respectivamente, de los ciclos de nutrientes y la sostenibilidad a largo plazo en la producción de alimentos. Estos principios están confirmados tanto en el régimen de regulación orgánica de la UE como en los EE. UU., Y actualmente dejan abierta la pregunta ambigua sobre si la acuaponía como sistema de producción de alimentos puede ser reconocida y certificada como orgánica. A pesar de la apertura en la regulación orgánica para nuevos conocimientos, adaptaciones e innovaciones, el sector orgánico en sí mismo se ha mostrado reacio a reconocer cultivos y tecnologías especiales intensivos basados en el conocimiento. Esto es particularmente difícil con respecto a los pequeños subsectores orgánicos como la horticultura y la producción acuícola. Ambos son subsistemas muy específicos del sector agrícola, donde la acuaponía potencialmente pertenecería a la intersección entre la horticultura de invernadero orgánica y la acuicultura orgánica. Por lo tanto, la acuaponía certificada orgánicamente necesitaría establecer un nicho dentro del sector orgánico. Entonces, para avanzar, existe una gran necesidad de un intercambio y una discusión pero abiertos entre los propios subsectores de acuaponía y orgánicos para explorar el potencial

P. R. Kledal (*)
Institute of Global Food & Farming, Hellerup, Denmark
e-mail: paul@igff.dk
B. König
Faculty of Life Sciences, Thaer-Institute, Horticultural Economics and IRI THESys, Humboldt Universität zu Berlin, Berlin, Germany
D. Matulić
Department of Fisheries, Beekeeping, Game management and Special Zoology, Faculty of Agriculture, University of Zagreb, Zagreb, Croatia
e-mail: dmatulic@agr.hr

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_17

pero también las limitaciones de sus respectivos modelos de producción. Sin embargo, entre los dos sistemas de producción de alimentos, debería haber espacio para el debate con el fin de encontrar roles nuevos y factibles para la acuaponia en la comunidad orgánica.

Palabras clave: Acuaponía, Certificación orgánica; Regulación orgánica de la UE; Regulación orgánica de los EE. UU.; Acuicultura de recirculación; Hidroponía.

19.1 INTRODUCCIÓN

La acuaponía es un sistema integrado de producción de alimentos multitróficos de circuito cerrado que combina elementos de un sistema de recirculación acuícola (RAS) e hidroponía (Endut et al. 2011; Goddek et al. 2015; Graber y Junge 2009). Por lo tanto, la acuaponía se discute como un sistema sostenible de producción de alimentos ecológicos, donde el agua enriquecida con nutrientes de los tanques de peces se recircula y se utiliza para fertilizar los lechos de producción de vegetales, haciendo un buen uso de los valiosos nutrientes que en los sistemas convencionales de acuicultura se descartan (Shafahi y Woolston 2014) y presenta una posible solución a un problema ambiental que generalmente se conoce como eutrofización de los ecosistemas acuáticos.

La agricultura orgánica también se basa en los principios naturales de recirculación y minimización de recursos, según lo definido por la Federación Internacional de Movimientos de Agricultura Orgánica (IFOAM 2005):

La agricultura orgánica es un sistema de producción que sustenta la salud de los suelos, los ecosistemas y las personas. Se basa en procesos ecológicos, biodiversidad y ciclos adaptados a las condiciones locales, en lugar del uso de insumos con efectos adversos. La agricultura orgánica combina tradición, innovación y ciencia para beneficiar el entorno compartido y promover relaciones justas y una buena calidad de vida para todos los involucrados.

Debido a la naturaleza cíclica o sistémica de ambos sistemas de producción, obtener la certificación orgánica podría parecer un paso natural para que participe un investigador, diseñador de sistemas o productor de acuaponía con orientación comercial. Por otro lado, los principios subyacentes de acuaponía y producción orgánica. difieren considerablemente. Desde una perspectiva de investigación, se podría argumentar que la discusión sobre la acuaponía es orgánica o no demuestra un caso interesante entre dos

polos de pensamiento de sistemas agroalimentarios, a saber, agroindustrial (convencional) y agroecológico (orgánico). De alguna manera, la acuaponia necesita encontrar su lugar en este continuo.

El objetivo de este capítulo es arrojar luz sobre el statu quo actual con respecto a las barreras de la certificación de acuaponía como producción de alimentos orgánicos, y discutir los principios subyacentes, contradicciones y puntos de vista sobre su sostenibilidad. También discutirá posibles escenarios futuros que surjan de los vínculos entre los fundamentos y las implementaciones de los dos sistemas de producción. Podemos considerar tanto la agricultura orgánica como la acuaponía como sistemas de producción de alimentos, porque tanto los agricultores como los productores de acuaponía se enfrentan a situaciones complejas de toma de decisiones que involucran el equilibrio de insumos interconectados e interrelacionados, factores externos (medio ambiente, mercados, cadenas de valor, etc.) y procedimientos de gestión para producir alimentos.

19.1.1 Sistemas de producción acuaponía y la tecnología aplicada

Los sistemas actuales de producción de acuaponía generalmente se clasifican de acuerdo con el tipo de tecnología aplicada a la parte de producción de la planta, y si la integración se combina en un solo circuito entre las plantas y los peces o se desacopla en bucles separados. Las tecnologías más comunes aplicadas en la producción de plantas son: (1) The Deep Water Culture (DWC) o en la literatura a menudo llamada UVI porque se desarrolló originalmente en la Universidad de Virgin Island, (2) NFT (Nutrient Fluid Technology) y (3) 'Inundación y reflujo'. El DWC y el NFT son las tecnologías más comunes o "clásicas" aplicadas a la producción de plantas, y a menudo el pescado y la producción de plantas están conectados en un circuito dependiente de flujo de agua y nutrientes. Esta singular conexión e interdependencia de todo el sistema es un factor que aumenta enormemente los riesgos y es una barrera principal para establecer una producción comercial a gran escala. Las principales diferencias entre los primeros dos sistemas están relacionadas con la forma en que se cultivan las plantas.

En el sistema DWC, el lecho de la planta es el sistema de flotación donde las plantas crecen en RAFT (generalmente poliestireno) que flotan en tanques largos de ancho variable, actuando como un biofiltro extenso y un tampón de agua, regulando las fluctuaciones de temperatura y pH.

En el sistema NFT, las plantas se cultivan en tuberías de plástico hidropónico, bien conocidas por la horticultura moderna. Una fina capa de

agua nutritiva suministrada a las tuberías alimenta las plantas. En ambos casos de NFT y DWC, los agujeros para las plantas están fijos, lo que limita al productor en cuanto a qué tipo de plantas se pueden producir. En algunos sistemas de acuaponia, ambas tecnologías de cultivo de plantas de DWC y NFT se aplican al mismo tiempo, lo que brinda más flexibilidad y seguridad mientras se ejecuta un ciclo de acuaponía singular (Kledal y Thorarinssdottir 2018).

En la tercera categoría, "Flood and Ebb", las plantas se cultivan en macetas colocadas en mesas de plantas (a menudo móviles), y luego se alimentan dos o tres veces al día inundando las mesas durante 5–10 min. Las tablas de plantas ofrecen la opción del productor con flexibilidad en la elección de las plantas cultivadas y el tamaño de las macetas, así como la posibilidad de utilizar el suelo y esto abre la posibilidad de la certificación orgánica.

En los últimos años, la acuaponía desacoplada está comenzando a surgir como el sistema de producción aplicable a la producción comercial de acuaponía a gran escala (Fig. 19.1). En la acuaponía desacoplada, la producción de peces y plantas, cada uno tiene su propio circuito de suministro de agua, pero también está conectado entre sí a través de un tanque de fertilizantes que suministra deficiencias de nutrientes a las plantas. De esta manera, se eliminó la dependencia entre el pescado y la producción de la planta, pero los beneficios simbióticos se mantienen permitiendo la inversión en la producción comercial a gran escala. Actualmente hay cierto debate sobre las ventajas de la acuaponía circulante o acoplada versus desacoplada (Goddek et al. 2016). Sin embargo, todavía no existe un consenso sobre el estado de los sistemas desacoplados, ya que podrían considerarse simplemente como otro método de suministro de nutrientes para las plantas, siempre y cuando el agua no vuelva a circular hacia los peces (Junge et al. 2017).

En general, la acuaponía está recibiendo un mayor interés a nivel mundial como un método de producción de alimentos sostenible, y con las perspectivas de promover la acuaponía a escala comercial, existe un interés equivalente en recibir la certificación orgánica con sus primas de precio relacionadas con el producto. Según Kledal y Thorarinssdottir (2018) y König et al. (2018), los sistemas comercialmente disponibles de acuaponia se basan principalmente en la investigación realizada por Rakocy y sus compañeros de trabajo (Rakocy 1999a, b, 2002, 2009; Rakocy et al. 2001, 2004, 2006, 2009), como anteriormente descrito (las tecnologías de producción clásicas 1 y 2 anteriores) donde las plantas y los peces están conectados en un bucle dependiente singular. Del mismo modo, la mayoría de los sistemas de producción, ya sea que estén basados en DWC, NFT o

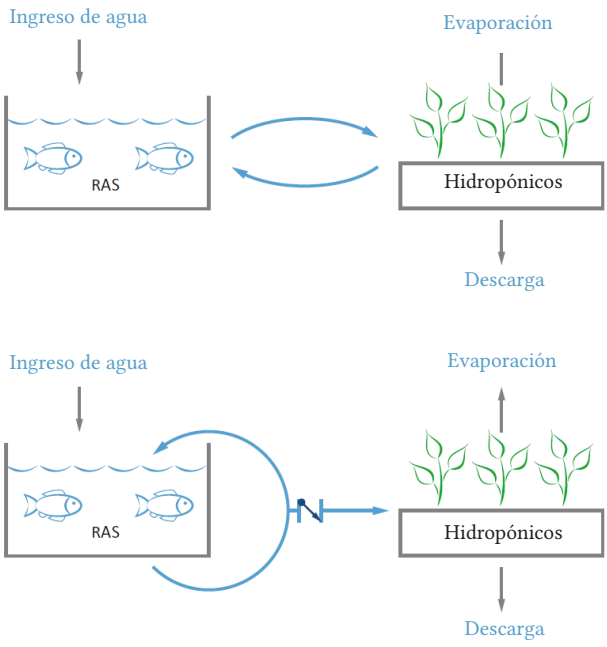


Fig. 19.1 (a) acoplado (b) sistema de acuaponía desacoplado. (Adaptado de Peterhans 2015)

mesas de plantas móviles con "Inundación y reflujo", no están utilizando un medio de crecimiento orgánico, por lo tanto ya excluyen ellos mismos de obtener una certificación orgánica para la parte hortícola. Con respecto a la producción de acuaponia, el acceso a alimentos orgánicos para peces en general solo está disponible para algunas especies comerciales de peces de agua dulce. Por lo tanto, aparte de los diversos factores de entrada, existen limitaciones para comenzar una producción de acuaponia orgánica a escala comercial.

Por lo tanto, podemos ver que a pesar del creciente interés en comercializar acuaponia como un sistema de producción de alimentos respetuoso con el medio ambiente, el actual régimen de legislación orgánica en la UE y EE. UU. Prohíbe que se reconozca la acuaponía como tal (NOSB 2017). Sin embargo, la discusión no está finalizada y, aunque está en curso, algunas agencias privadas de certificación en los EE. UU. Permiten la certificación de las verduras como orgánicas (Friendly Aquaponics 2018).

19.1.2 Acuaponia y el régimen de regulación orgánica de la UE

En la UE, el marco regulatorio actual para la producción de peces y hortalizas orgánicas está regulado por el Reglamento (CE) nº 834/2007 del

Consejo, mientras que las normas más detalladas están reguladas por el Reglamento (CE) nº.889/2008 y (CE) no. 710/2009. Sin embargo, el régimen regulatorio orgánico de la UE no tiene estándares o regulaciones para certificar la acuaponía como orgánica. La regulación orgánica se basa en los objetivos y principios de reconocer la agricultura orgánica como una producción de alimentos basada en recursos naturales (Lockeretz 2007; Aeberhardt y Rist 2008). Esto está respaldado en el anexo del reglamento de implementación por la exclusión de insumos no permitidos para la agricultura orgánica. En consecuencia, los sistemas de cultivo de acuaponia que utilizan la tecnología RAS y la producción de vegetales sin suelo (hidroponía) no pueden certificarse como orgánicos según la presente normativa orgánica de la UE.

Sin embargo, entre los practicantes de acuaponia, hay una discusión continua sobre acuaponia y certificación orgánica. En primer lugar, los rápidos desarrollos industriales dentro de la cría de peces y la diversificación del mercado y la demanda de productos orgánicos hacen que sea económicamente deseable calificar para la prima del precio orgánico como una forma de reembolsar las altas inversiones de capital requeridas para acuaponia comercial. En segundo lugar, parece natural vincular una producción de alimentos respetuosos con el medio ambiente, como la acuaponía, a las etiquetas de certificación ya bien establecidas y las percepciones de los consumidores de una producción alimentaria sostenible en lugar de incurrir en los altos costos de transacción de crear una etiqueta de alimentos completamente nueva.

En vista de las discusiones actuales sobre recursos limitados para la producción de alimentos, el bienestar animal, la creciente presión sobre la sostenibilidad del medio ambiente acuático, en paralelo con el progreso tecnológico en curso dentro de la acuaponía, este artículo pregunta por qué la acuaponía no puede ser certificada como orgánica. En el siguiente párrafo, se examinarán las reglas y regulaciones orgánicas bajo el régimen de la UE que crean barreras para la acuaponia.

19.2 REGULACIONES ORGÁNICAS

19.2.1 Reglas Orgánicas en Horticultura

La tecnología de producción hidropónica en ausencia de un medio de crecimiento orgánico no puede certificarse como orgánica, lo que ha demostrado ser una barrera efectiva a largo plazo para la conversión de los productores existentes de hortalizas de invernadero a esquemas de agricultura orgánica (König 2004). Para los productos hortícolas, la

regulación específica de la UE que impide que los productos producidos bajo sistemas de acuaponía "clásicos" para obtener una certificación orgánica sean los siguientes:

> *Reglamento 834/2007 (12): ... Las plantas deben alimentarse preferiblemente a través del ecosistema del suelo y no a través de fertilizantes solubles agregados al artículo 889/2008 del suelo. (4): La agricultura orgánica se basa en nutrir las plantas principalmente a través del ecosistema del suelo. Por lo tanto, no debe permitirse el cultivo hidropónico, donde las plantas crecen con sus raíces en un medio inerte alimentado con minerales y nutrientes solubles.*

Dado que la acuaponia se basa en el uso de lodos de pescado como fuente de fertilización de las plantas, la ausencia de fertilizantes minerales al principio parecería un paso hacia la producción orgánica. Sin embargo, los sistemas de producción de acuaponia "clásicos" comenzaron a usar componentes de la tecnología hidropónica sin suelo, y por lo tanto las plantas producidas bajo dicho sistema no pueden ser certificadas como orgánicas. Para comprender esta prohibición en la regulación orgánica, es útil recordar que los productores desarrollaron y adoptaron la hidroponía como respuesta a los desafíos que los productores de invernadero enfrentaron en sistemas intensivos de cultivo de vegetales a base de suelo, p. Ej. enriquecimiento del suelo con patógenos transmitidos por el suelo. Por el contrario, el enfoque de la horticultura orgánica parte de la cuestión de cómo debe ser la agricultura de invernadero para evitar estos desafíos. Su punto de partida es, en cambio, cambiar la gestión del suelo en lugar de inventar una tecnología de producción sin suelo.

Además de este principio general de producción basada en el suelo, la horticultura orgánica puede considerarse un nicho especializado dentro de la agricultura orgánica que ofrece una considerable variedad de cultivos. La legislación para hortalizas de frutas, como tomate, pepino, pimiento, berenjena, etc. prescribe el cultivo en suelo natural. Las plantas vendidas con el suelo, como las plántulas o las hierbas en macetas, pueden certificarse como orgánicas. El requisito previo es que la planta pueda seguir creciendo en el invernadero del cliente o en la ventana de la cocina. Esto significa que los racimos de hierbas, ensaladas cortadas de las raíces deben cultivarse en el suelo para calificar para la certificación orgánica. Los insumos permitidos para la producción orgánica están regulados en la regulación de implementación. Para Alemania, Suiza y los Países Bajos, FiBL (Instituto de Investigación de Agricultura Orgánica) mantiene las pruebas y la aprobación de insumos para la producción orgánica, que actualmente apuntan a desarrollar una Lista Europea de insumos certificados como adecuados para el estado orgánico.

El suministro de nutrientes en la producción de invernadero orgánico es un desafío. No solo los fertilizantes minerales son comunes en los sistemas de producción hidropónica, sino que, en el caso especial de las asociaciones alemanas de agricultores orgánicos (más allá de la legislación de la UE), también los hidroxilatos de origen animal (entrevista con el servicio de extensión orgánica). Los productores de invernaderos que han invertido en infraestructura para sellar el suelo natural con pisos de invernadero permanentes, se han enfrentado a una barrera efectiva desde hace mucho tiempo para la conversión de la infraestructura de invernadero existente en esquemas de agricultura orgánica, a excepción de las hierbas en macetas (König 2004). Las nuevas inversiones en infraestructura de invernaderos han contribuido al aumento de la producción orgánica de frutas y verduras en los últimos años, p. en Alemania. Sin embargo, para estos productores orgánicos modernos, la acuaponía aún no proporciona ninguna solución, ya que están buscando respuestas en las áreas de suelos adecuados, rotación de cultivos mejorada, microorganismos efectivos, compost y similares.

La horticultura se enfrenta al desafío general de que la regulación orgánica de la UE no es muy detallada en esta área. Teóricamente, esto deja espacio para nuevos enfoques de producción como la acuaponía. Sin embargo, en esta etapa de desarrollo dentro de la horticultura orgánica comercial y la acuaponía, los costos iniciales para los productores son inmensamente altos, y mucho menos la búsqueda de información sobre gestión de producción, prohibiciones, rendimientos potenciales, etc. Al final, la idoneidad de los sistemas de producción innovadores se dejan a la decisión de la autoridad de certificación local proyecto por proyecto (König et al. 2018).

Sin embargo, dado que el punto de partida en la agricultura orgánica se trata de la producción basada en el suelo y el hecho de que la horticultura, la acuicultura y la acuaponía son pequeños subsectores; El régimen de regulación de la UE sobre producción orgánica puede no ser algo que se espera que cambie en el futuro cercano.

19.2.2 Reglas orgánicas en acuicultura

Para la acuicultura orgánica, la producción está regulada por el Reglamento de la Comisión de 889/2008 y 710/2009. En parr. 11. Reglamento de la Comisión (2009), las tecnologías de recirculación están claramente prohibidas en la acuicultura orgánica, a excepción de la producción específica en criaderos y viveros que producen y venden crías para un mayor crecimiento en los sistemas de estanques al aire libre.

Parr. 11.
El desarrollo técnico reciente ha llevado al uso creciente de sistemas cerrados de recirculación para la producción acuícola, tales sistemas dependen de insumos externos y alta energía, pero permiten la reducción de descargas de desechos y la prevención de fugas. Debido al principio de que la producción orgánica debe estar lo más cerca posible de la Naturaleza, el uso de tales sistemas no debe permitirse para la producción orgánica hasta que se disponga de más conocimientos. El uso excepcional debe ser posible solo para la situación de producción específica de criaderos y viveros.

Dado que la tecnología de recirculación es el núcleo del sistema de producción de acuaponía, actualmente no es posible obtener una certificación orgánica completa de un sistema de acuaponía, si todos los productos de acabado se venden para el mercado de consumo.

Del mismo modo, la regulación orgánica sobre la densidad de peces en estanques abiertos y jaulas marinas se realiza principalmente para asegurar una descarga mínima de estiércol al medio acuático. Las preguntas sobre el bienestar de los peces son, por lo tanto, un asunto indirecto relacionado con su bienestar basado en el nivel de intercambio de agua dulce en los estanques. La densidad de población en los sistemas de acuicultura orgánica suele ser de 1/4 a 1/3 de la de los sistemas RAS modernos y, por lo tanto, desde un aspecto económico, no es muy rentable para esta tecnología. Al mismo tiempo, necesitamos investigación y desarrollo sobre indicadores de bienestar animal y herramientas de monitoreo factibles y significativas como prerrequisito para discutir densidades de población específicas. Solo así podremos evaluar la viabilidad económica potencial de la parte de la acuicultura de un sistema de acuaponía orgánica (Ashley 2007; Martins et al. 2012). 19.2.3 Acuaponia y el régimen de regulación orgánica de EE. UU.

Al igual que en Europa, hay una discusión en curso en los EE. UU. Sobre cómo manejar los enfoques sin tierra o de reemplazo del suelo para el suministro de nutrientes a las plantas como un medio de producción de alimentos eficiente en recursos y su inclusión o exclusión del esquema de certificación orgánica. A pesar de estas discusiones, el estado del arte es algo indeciso similar al de Europa, pero las prácticas difieren: recientemente, el Subcomité de Cultivos de la Junta Nacional de Normas Orgánicas sugirió hacer prácticas prohibidas de aeroponía, acuaponía e hidroponía bajo la Secta. 205.105 del Reglamento Orgánico del USDA (NOSB 2017). Esta decisión fue rechazada con 8: 7 votos, pero no logró 10 votos para hacer que la decisión sea una recomendación del NOSB al USDA. Solo el rechazo a la aeroponía encontró suficientes votos (14 de 15,

NOSB 2017). Por lo tanto, el Servicio de Comercialización Agrícola del USDA solo está revisando la recomendación de excluir la aeroponía de la certificación orgánica (AMS 2018, p.2). Esta decisión de NOSB había sido forzada en el pasado debido a prácticas no armonizadas entre agencias de certificación orgánica acreditadas, por lo que algunas de ellas certificaron la hidroponía como orgánica bajo el Programa Nacional Orgánico (NOP) mientras que otras no. Estas prácticas diferentes se pueden ver como resultado de un largo proceso de discusión sin conclusiones claras, que termina con ocho certificadores que certifican las operaciones hidropónicas como orgánicas en 2010 y un aumento del 33% de los productores hidropónicos certificados orgánicos (NOSB 2016: informe del subcomité de hidroponía y acuaponia) . Ya en 2010, el NOSB había recibido una recomendación para una regla federal con respecto a los sistemas de producción de invernadero, indicando básicamente que: media Los medios de cultivo contendrán suficiente materia orgánica capaz de soportar la ecología del suelo natural y diversa. Por esta razón, los sistemas hidropónicos y aeropónicos están prohibidos ". Sin embargo, esta prohibición explícita no entró en la ley actual (NOSB 2010, 2016: 122). En cambio, la definición más abierta de la producción orgánica a partir de 2002 estaba en su lugar, donde la producción orgánica es '[un] sistema de producción que se gestiona de acuerdo con la Ley y los reglamentos en esta parte para responder a las condiciones específicas del sitio mediante la integración cultural, biológica y prácticas mecánicas que fomentan el ciclo de los recursos, promueven el equilibrio ecológico y conservan la biodiversidad '(NOSB 2016, p. 7). El subcomité de hidroponía y acuaponia concluye que:

"Según la ley actual y la aclaración de NOP / USDA, los métodos de producción hidropónicos y acuaponicos están legalmente permitidos para la certificación como USDA Organic siempre que el productor pueda demostrar el cumplimiento de las regulaciones orgánicas del USDA".

(NOSB 2016, p. 10-11). Sin embargo, la dificultad es que la producción orgánica se trata del manejo del suelo, mientras que la hidroponía es un sistema de manejo de fertilizantes. Al no abordar esta diferencia, podría producirse cierta ambigüedad y posibles consecuencias negativas para el apoyo de la certificación orgánica por parte de los agricultores y los consumidores (AMS 2016). En el (NOSB 2016, Informe del Subcomité de Etiquetado Alternativo), otros expertos presentaron una variedad de ideas sobre cómo podrían aparecer las etiquetas dentro del esquema orgánico del USDA o en el exterior. Debido a la falta de estándares y normas, que es una base necesaria para las etiquetas, el grupo no llegó a un consenso. La opinión era que, si se incluía la acuaponía o se agregaba una etiqueta

adicional, entre la gran diversidad ya existente entre los diferentes sistemas de producción orgánica, desafiaría el proceso de certificación y sería una fuente de confusión para los consumidores. Curiosamente, las sugerencias de alternativas de etiquetado bajo el paraguas orgánico del USDA, o además de él, resaltan la evidencia anecdótica de que el principio de las granjas de acuaponia parece ser atractivo para los consumidores, y que no necesitan ser certificados como orgánicos para ser viables (NOSB 2016, Informe del Subcomité de Etiquetado Alternativo, p.5).

En resumen, el NOSB (2016) proporciona una descripción detallada del proceso desde principios de la década de 1990 hasta hoy, que refleja también las diferentes opiniones de las partes interesadas involucradas en esta discusión. La Ley de Producción de Alimentos Orgánicos de 1990 (OFPA) se basa en esta base para el desarrollo de la certificación orgánica federal de los EE. UU. Para el NOSB, y desde entonces la discusión sobre permitir o no los sistemas de producción en invernadero para la certificación orgánica o no ha estado vigente (NOSB 2016). En este momento, existe un acuerdo en la discusión que reconoce que las raíces de la agricultura orgánica radican en la preocupación por la fertilidad y la calidad del suelo. Todas las prácticas y estándares de agricultura orgánica desarrollados se basan en esta premisa, y cualquier discusión sobre su desarrollo posterior debe comenzar desde este punto de vista.

En la discusión, hay más preguntas abiertas sobre si los hidropónicos se pueden llamar orgánicos o no. La comparación de la agricultura convencional y la orgánica, en el caso de los cultivos hortícolas de invernadero, depende de algunos problemas mal investigados o aún controvertidos (NOSB 2017):

El tipo de práctica agrícola también puede explicar las diferencias encontradas en productos orgánicos y convencionales, p. menor contenido de metabolitos de plantas secundarias de hortalizas de invernadero cultivadas convencionalmente en comparación con hortalizas orgánicas de la agricultura de campo. Al permitir que la hidroponía se certifique como orgánica, este valor agregado actualmente comunicado de los productos orgánicos ya no se puede comunicar a los consumidores como valor agregado sin ambigüedades.

Una fuente importante de nutrientes en los sistemas hidropónicos es la harina de soya hidrolizada, que los productores estadounidenses importan de Europa para garantizar un abastecimiento libre de OGM compatible con los estándares orgánicos. Esto afecta negativamente a la sostenibilidad general.

Un principio de la agricultura orgánica es tratar con la resiliencia, que se duda de los sistemas de cultivo hidropónicos y acuaponicos, ya que dependen en gran medida de un suministro de energía externo (observaciones anecdóticas). Los opositores afirman que las granjas orgánicas tampoco son "resistentes" a los desastres naturales severos, pero ambos grupos permanecen algo confusos sobre su concepto de resiliencia cuando se aplican a estos sistemas de producción.

Una comparación de procesos en la superficie de la raíz, es decir, el ambiente microbiano en el suelo versus el agua y la absorción de nutrientes, es una pregunta abierta y los opositores argumentan que la literatura sobre este tema se percibe como insuficiente. Por el contrario, todos los argumentos que se pueden encontrar en Europa sobre por qué los cultivos hidropónicos o acuaponicos deben certificarse como orgánicos también se traen a discusión en los Estados Unidos. Sin embargo, el punto más notable es la falta de datos sobre la comparación directa de sistemas para poder evaluar los impactos y ventajas mencionados sistemáticamente. En resumen, el NOSB rechazó etiquetar los sistemas hidropónicos o acuaponicos como orgánicos en general porque (NOSB 2017, p. 70-71):

§ 6513 Plan orgánico: "Un plan orgánico deberá contener disposiciones diseñadas para fomentar la fertilidad del suelo, principalmente a través del manejo del contenido orgánico del suelo mediante la labranza adecuada, la rotación de cultivos y el abono ... Un plan orgánico no incluirá ninguna producción o prácticas de manejo que son inconsistentes con este capítulo ".
§ 205.200 General: "Las prácticas de producción implementadas de acuerdo con esta subparte deben mantener o mejorar los recursos naturales de la operación, incluida la calidad del suelo y el agua".

§ 205.203 Estándar de práctica de manejo de la fertilidad del suelo y el manejo de nutrientes del cultivo: (a) el productor debe seleccionar e implementar prácticas de labranza y cultivo que mantengan o mejoren la condición física, química y biológica del suelo y minimicen la erosión del suelo ". (b) "El productor debe gestionar los nutrientes de los cultivos y la fertilidad del suelo mediante rotaciones, cultivos de cobertura y la aplicación de materiales vegetales y animales". (c) "El productor debe gestionar los materiales vegetales y animales para mantener o mejorar el contenido de materia orgánica del suelo ..."

Más tarde, en el año 2016, se dieron definiciones para hidroponía, acuaponía y aeroponía, indicando acuaponía que (NOSB 2017, p. 82):

> La producción de acuaponía es una forma de hidroponía en la cual las plantas obtienen algunos o todos sus nutrientes en forma líquida de los desechos de pescado. La acuaponía se define aquí como un sistema hidropónico de recirculación en el que las plantas crecen en nutrientes provenientes de las aguas residuales de animales acuáticos, que pueden incluir el uso de bacterias para mejorar la disponibilidad de estos nutrientes para las plantas. Las plantas mejoran la calidad del agua mediante el uso de nutrientes, y el agua luego se recircula a los animales acuáticos.

El NOP tiene estándares estrictos para el manejo del estiércol animal en la producción orgánica terrestre, pero no existen tales estándares para garantizar la seguridad de los alimentos vegetales producidos en los desechos fecales de los vertebrados acuáticos. Además, el NOP aún no ha emitido normas para la producción de acuicultura orgánica, de las cuales dependería la producción de plantas de acuaponia. 'El Subcomité de Cultivos se opone a permitir que los sistemas de producción acuaponia sean certificados orgánicos en este momento.

Si se emiten estándares de acuicultura en el futuro, y se resuelven las preocupaciones sobre la inocuidad de los alimentos, se podría reconsiderar la acuaponia "(NOSB 2017, p. 82).

Allí está la certificación i Naturally Grown', una revisión de pares, certificación de base, que explícitamente incluye acuaponía (https://www.cngfarming.org/aquaponics). Esta certificación implica un catálogo con criterios de enero de 2016. Solo el producto vegetal está certificado, no la parte de pescado porque en este momento (por ejemplo, alimento para peces) no cumple con los criterios generales para la certificación de ganado. Los criterios regulan los siguientes aspectos: diseño y componentes del sistema, materiales para los componentes principales del sistema y medios de cultivo / soporte de raíces, fuentes de agua, monitoreo, insumos para el ajuste del pH, uso y eliminación de desechos, producción y manejo de cultivos, manejo de peces, ubicación y tampones, Energía y mantenimiento de registros. El esquema se basa en esquemas de inspección por pares y no permite el uso de pesticidas y fungicidas sintéticos, pesticidas a base de cobre, pesticidas o fungicidas a base de petroquímicos. No regula los componentes en la parte de la planta, pero evalúa sus funciones: regulación del agua, aireación, desgasificación, biofiltración y eliminación de residuos sólidos de pescado.

En resumen, existen organismos de certificación orgánicos individuales en los EE. UU. Que certifican la acuaponía (partes) como producción orgánica, pero también se informa de casos de agricultores que afirman la produc-

ción orgánica sin estar certificados (Friendly Aquaponics 2018). Después de la publicación de este capítulo, puede haber nuevos desarrollos que afecten el tema de la certificación orgánica. Además, el tema de la agricultura urbana se declara como agricultura y, por lo tanto, es elegible para fondos agrícolas, podría obtener un estado más claro con la nueva Ley Agrícola de EE.

19.3 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este capítulo ha intentado aclarar los aspectos regulatorios relevantes para comprender por qué la acuaponía actualmente no es elegible para la certificación orgánica en la UE y los EE. UU. Como en la UE, el paradigma principal detrás de la agricultura orgánica en los EE. UU. Es brevemente, para gestionar los suelos de forma natural. En la UE, las autoridades locales no toman las decisiones de certificación orgánica para acuaponía orgánica, mientras que EE.UU. Ha visto un crecimiento en este tipo de acción en los últimos años, así como un aumento en las certificaciones y decisiones privadas de revisión por pares agencias de certificación orgánica.

En principio, todas las regulaciones orgánicas de la UE están abiertas a la adaptación tan pronto como haya nueva evidencia científica, como se indica en el párrafo 24.

> Parr. 24:
> La acuicultura orgánica es un campo relativamente nuevo de producción orgánica en comparación con la agricultura orgánica, donde existe una larga experiencia a nivel de granja. Dado el creciente interés de los consumidores en los productos de acuicultura orgánica, es probable un mayor crecimiento en la conversión de unidades de acuicultura en producción orgánica. Esto pronto conducirá a una mayor experiencia y conocimiento técnico. Además, se espera que la investigación planificada genere nuevos conocimientos, en particular sobre los sistemas de contención, la necesidad de ingredientes alimenticios no orgánicos o las densidades de almacenamiento para ciertas especies. Los nuevos conocimientos y el desarrollo técnico, que conducirían a una mejora en la acuicultura orgánica, deberían reflejarse en las reglas de producción. Por lo tanto, debe preverse la revisión de la legislación actual con el fin de modificarla cuando corresponda.

Por lo tanto, los sectores hortícola, acuícola y orgánico tendrían que organizarse, integrando el conocimiento de diferentes dominios. Sin embargo, existen dificultades para convocar debates tan intensivos en conocimiento como los expertos y el las comunidades de práctica están fragmentadas y dispersas. Además, es un esfuerzo intensivo en conocimiento: el subcomité de NOSB sobre hidroponía y acuaponía declaró que

una justificación profunda necesitaría más tiempo (NOSB 2017; Informe del subcomité de hidroponía y acuaponía, p. 2). En la UE, el Instituto de Investigación Orgánica más importante (FiBL) que participa en la regulación y las pruebas de entrada tiene su sede en Suiza. Sin embargo, con su nuevo paraguas organizativo ahora ubicado en Bruselas, se espera que las circunstancias mejoren en los próximos años. Aún así, revisar todos los detalles de cada componente de la hidroponía y la acuicultura planteará nuevas preguntas que solo unos pocos expertos en invernaderos orgánicos y acuicultura en Europa podrán responder. Los actores de acuaponia podrían estar en una situación para discutir (a) el enfoque de economía circular, p. desde el punto de vista de la evaluación del ciclo de vida y en términos de los componentes de construcción y producción utilizados para compararlo con una producción basada en el suelo y (b) considerar la cuestión de cómo la acuaponía mejora la situación in situ (sostenibilidad) producción de peces y plantas. Hacer tales preguntas puede estimular ideas para nuevos acuaponios diseñados por el sistema que podrían ser percibidos como interesantes por la comunidad orgánica. Sin embargo, también puede levantar barreras nuevas (o de hecho antiguas) para la implementación de la producción orgánica a gran escala, p. Ej. pensando en macetas orgánicas que no representan un desafío para la maceta para ensaladas de acuaponia e indicadores de bienestar de peces con el fin de desarrollar densidades de almacenamiento específicas para especies basadas en el conocimiento. De esta manera, los cambios en el diseño del sistema pueden generar nuevas preguntas de investigación.

Por el momento, una investigación y desarrollo más colaborativos en el desarrollo de sistemas de acuaponia para el sector orgánico podría ser una vía interesante que sería mejor debatir y desarrollar entre expertos y productores de mente abierta de acuaponia, producción de invernadero orgánico y acuicultura orgánica. Para concluir, existe una gran necesidad de un intercambio de conocimiento y discusión entre los acuaponios y los nichos orgánicos para explorar los potenciales y las limitaciones de sus respectivos modelos de producción, y llegar a algún tipo de consenso sobre si existe un papel futuro para la recirculación sistemas de acuaponia en la comunidad orgánica y cómo se vería realmente la acuaponia orgánica. Pero con las diversas visiones de los sistemas de acuaponia por parte de empresarios, agricultores, investigadores y comunidades ya existentes, ¿qué los certificaría a todos como medios orgánicos para la comunicación con el consumidor, el marketing y el logro de objetivos de sostenibilidad? En los Estados Unidos como en Europa, la pregunta es ¿quién se beneficiaría de la certificación orgánica de acuaponia? En la actualidad, la acuaponia parece ser un patito feo tanto dentro de los regímenes convencionales como de agricultura orgánica, pero en el futuro puede convertirse en un

hermoso cisne sostenible, ¿y puede ser certificado orgánico?.

REFERENCIAS

Aeberhardt A, Rist S (2008) Koproduktion von Wissen in der Entwicklung des Biolandbaus – Einflüsse von Marginalisierung, Anerkennung und Markt. In: Mayer J, Alföldi T, Leiber F, Dubois D, Fried P, Heckendorn F, Hillmann E, Klocke P, Lüscher A, Riedel S, Stolze M Strasser F, van der Heijden M, und Willer H (Hrsg.) 2009. Werte – Wege – Wirkungen: Biolandbau im Spannungsfeld zwischen Ernährungssicherung, Markt und Klimawandel. Beiträge zur 10. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, ETH Zürich, 11.-13. Februar 2009. http://orgprints.org/14377/1/Aeberhard_14377.pdf

AMS (2016) Memorandum to the national organic standards board. Hydroponic and Aquaponic Task Force Report. Agricultural Marketing Service. https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/2016%20Hydroponic%20Task%20Force%20Report.PDF. Accessed 2 Feb 2019

AMS (2018) Memorandum to the National Organic standards board. Response to National Organic Standards Board Recommendations (Fall 2017 Meeting). https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/NOPResponsetoNOSBFall2017.pdf. Accessed 2 Feb 2019

Ashley PJ (2007) Fish welfare: current issues in aquaculture. Appl Anim Behav Sci 104(3–4):S.199–S. 235

Commission Regulation (2008) (EC) no 889/2008 of 5 September 2008 laying down detailed rules for the implementation of council regulation (EC) no 834/2007 on organic production and labelling of organic products with regard to organic production, labelling and control. Off J Eur Union 2008(1):84

Commission Regulation (2009) (EC) No 710/2009 of 5 August 2009 amending Regulation (EC) No 889/2008 laying down detailed rules for the implementation of Council Regulation (EC) No 834/2007, as regards laying down detailed rules on organic aquaculture animal and seaweed production. Off J Eur Union L 204:15–34

Endut A, Jusoh A, Ali N, Nik WBW (2011) Nutrient removal from aquaculture wastewater by vegetable production in aquaponics recirculation system. Desalin Water Treat 32:422–430. https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2761

Friendly Aquaponics (2018) USDA organic certification of aquaponic systems. https://www. friendlyaquaponics.com/organic-certification/. Accessed 21 Dec 2017

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https:// doi.org/10.3390/su7044199

Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S, Keesman

KJ (2016) Navigating towards decoupled aquaponic systems: a system dynamics design approach. Water 8:303

Graber A, Junge R (2009) Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination 246:147–156

IFOAM (2005) Definition of organic farming. https://www.ifoam.bio/en/organic-landmarks/definition-organic-agriculture. Accessed 2 Feb 2019

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Haïssam Jijakl M (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182

Kledal PR, Thorarinssdottir R (2018) Aquaponics: a new niche for sustainable aquaculture, 173-190. In: Hai FI, Visvanathan C, Boopathy R (eds) Sustainable aquaculture. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2

König B (2004) Adoption of sustainable production techniques: structural and social determinants of the individual decision making process. In: Proceedings of the 15th international symposium on horticultural economics and management, Berlin, Aug 29–Sept 3 2004

König B, Janker J, Reinhardt T, Villarroel M, Junge R (2018) Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. J Clean Prod 180:232–243. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037

Lockeretz W (2007) Organic farming. An international history. CAB International, Wallingford, p275

Martins CIM, Gakhardo L, Noble C, Damsgard B, Spedicato MT, Zupa W, Beauchaud M, Kulczykowska E, Massabuau J-C, Carter T, Planellas SR, Kristiansen T (2012) Behavioural indicators of welfare in farmed fish. Fish Physiol Biochem 38

NOSB (2010) Formal recommendation by the national Organic Standards Board (NOSB) to the National Organic Program (NOP). https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/NOP%20Final%20Rec%20Production%20Standards%20for%20Terrestrial%20Plants.pdf. Accessed 2 Feb 2019

NOSB (2016) Hydroponic and aquaponic subcommittee report 2016. Hydroponic & Aquaponic Subcommittee Report. Preserving a philosophy while embracing a changing world, In: NOSB 2016: National Organic Standards Board (NOSB) Hydroponic and Aquaponic Task Force Report. https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/2016%20Hydroponic%20Task%20Force%20Report.PDF. Accessed 21 Dec 2017

NOSB (2017) National organic standards board crops subcommittee proposal hydroponics and container – growing recommendations. August 29, 2017. https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/CSHydroponicsContainersNOPFall2017.pdf. Accessed 21 Dec 2017

Peterhans H (2015) Aquaponic nutrient model. Thesis project. MS Thesis. Wageningen University. p 37

Rakocy J (1999a) Aquaculture engineering – the status of aquaponics part 1.

Aquaculture Maga- zine, pp 83–88
Rakocy J (1999b) Aquaculture engineering – the status of aquaponics part 2. Aquaculture Maga- zine, pp 64–70
Rakocy J (2002) Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system. Virgin Islands
Rakocy J (2009) Ten guidelines for aquaponic systems. US Virgin Islands
Rakocy J, Bailey D, Shultz K, Cole W (2001) Evaluation of a commercial-scale aquaponic unit for the production of Tilapia and lettuce. University of the Virgin Islands, St. Croix
Rakocy J, Bailey D, Shultz C, Thoman E (2004) Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. University of the Virgin Islands
Rakocy J, Masser M, Losordo T (2006) Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics–integrating fish and plant culture. Southern Regional Aquaculture Center
Rakocy J, Bailey D, Shultz C, Danaher J (2009) Fish and vegetable production in a commercial aquaponic system: 25 years of research at the University of the Virgin Islands. Kingshill, Virgin Islands, USA
Shafahi M, Woolston D (2014) Aquaponics: a sustainable food production system. ASME Inter- national Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 3: Biomedical and Bio- technology Engineering. Montreal, Quebec, Canada, November 14–20, 2014

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 20

MARCOS REGULATORIOS PARA ACUAPONÍA EN LA UNIÓN EUROPEA

Tilman Reinhardt, Kyra Hoevenaars y Alyssa Joyce

Capítulo 20

MARCOS REGULATORIOS PARA ACUAPONÍA EN LA UNIÓN EUROPEA

Tilman Reinhardt, Kyra Hoevenaars y Alyssa Joyce

Resumen
Este capítulo proporciona una visión general del marco regulatorio para acuaponía y las perspectivas para la política de la Unión Europea (UE). Usando Alemania como ejemplo, analizamos las regulaciones específicas relativas a la construcción y operación de instalaciones de acuaponía y la comercialización de productos de acuaponía. Luego mostramos cómo la acuaponía encaja con las diferentes políticas de la UE y cómo podría contribuir a los objetivos de sostenibilidad de la UE. Al final, proporcionamos algunas recomendaciones sobre cómo podrían mejorarse las condiciones institucionales para la acuaponía como un sistema emergente de innovación tecnológica.

Palabras clave: Acuaponía; Derecho; Marco regulatorio; Producción orgánica; Bienestar animal; Etiquetado de alimentos, Políticas de seguridad alimentaria

20.1 INTRODUCCIÓN

Los marcos regulatorios pueden tener una influencia decisiva en la implementación de tecnologías sostenibles. Sin embargo, actualmente no existen regulaciones o políticas específicas para acuaponia en la Unión Europea (UE) o en la mayoría de sus estados miembros. Quizás una de las razones es que cae en la intersección de varios campos más grandes (acuicultura industrial, reciclaje de aguas residuales, hidroponía, acuicultura

T. Reinhardt (*)
GFA Consulting Group, Berlin, Germany
E-mail: tilman.reinhardt@gfa-group.de
K. Hoevenaars
AquaBioTech Group, Mosta, Malta
E-mail: kyh@aquabt.com
A. Joyce
Department of Marine Science, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden
E-mail: alyssa.joyce@gu.se

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_20

urbana), en donde los productores están sujetos a una variedad de regulaciones potencialmente dispares y conflictivas. El siguiente capítulo proporciona una visión general del marco regulatorio para acuaponía y ofrece algunas perspectivas sobre cómo se podría apoyar el desarrollo de acuaponía a través de la política de la UE. Se basa en el trabajo de Koenig et al. (2018) que han analizado la acuaponía a través del marco teórico para los sistemas emergentes de innovación tecnológica (ver Bergek et al. 2008) y han mostrado cómo las vías de desarrollo para esta acuaponía pueden estar influenciadas por las condiciones institucionales. La primera sección proporciona una visión general de las regulaciones específicas que rigen cada paso en el desarrollo de empresas acuapónicas, es decir, construcción, operación y comercialización. Analiza cómo este marco regulatorio proporciona incentivos o desincentivos para que empresarios individuales y actores del mercado inviertan en acuaponía. La segunda sección analiza cómo la acuaponía encaja con las diferentes políticas de la UE y cómo la acuaponía puede contribuir al logro de los objetivos de sostenibilidad de la UE. Luego muestra cómo las políticas y estrategias deben redefinirse para proporcionar mejores oportunidades en este sector. En la tercera sección, sacamos conclusiones de las lecciones aprendidas en las primeras secciones para proporcionar recomendaciones de políticas. Nota: La primera sección resume los hallazgos de una directriz legal sobre la viabilidad de los proyectos de acuaponía en Alemania. Se han omitido referencias detalladas a las regulaciones alemanas y la jurisprudencia para una mejor legibilidad. Una versión alemana con referencias a disposiciones específicas y jurisprudencia relevante está disponible a solicitud de los autores. Partes del segundo subcapítulo se han publicado en Eco cycles. Referencia: Hoevenaars, K., Junge, R., Bardocz, T. y Leskovec, M. 2018. Políticas de la UE: nuevas oportunidades para acuaponía. Eco cycles 4 (1): 10-15. DOI: 10.109040 / ecocycles.v4il.87.

20.2 MARCO LEGAL PARA ACUAPONÍA

En esta primera sección, nuestro objetivo es proporcionar una visión general de las regulaciones relevantes para la construcción y operación de instalaciones de acuaponía y la comercialización de productos producidos en acuaponía. Nos centramos específicamente en Alemania, ya que es imposible extrapolar en toda la UE dado que varias regulaciones importantes, especialmente en lo que respecta a la zonificación y la construcción, no se han armonizado en toda la UE. Aunque nos centramos en el contexto alemán, también se han informado hallazgos similares con respecto a la ley de planificación en otros países (Joly et al. 2015).

20.2.1 Reglamento sobre construcción

Las instalaciones de acuaponía deben cumplir con varios reglamentos de planificación, construcción y agua, muchos de los cuales no son competencia de la UE. En Alemania, el marco general para la planificación y la ley del agua se armoniza a nivel nacional, mientras que las regulaciones locales y de uso del agua se determinan a nivel estatal, con la planificación urbana y regional cubierta a nivel municipal.

20.2.1.1 Ley de planificación

La ley de planificación regula el uso del suelo y los requisitos relacionados con el área para proyectos de construcción. Existe una gran distinción entre proyectos en áreas urbanas periféricas e interiores.

De acuerdo con la Sección 35 del Código de Construcción alemán, las áreas periféricas deben ser se mantienen libres de edificios y se reservan para ciertos usos, como la agricultura o la producción de energía renovable. Si la acuaponía constituye o no agricultura en ese sentido sigue siendo una pregunta sin respuesta: mientras que los tribunales han dictaminado que el cultivo sin suelo de vegetales como la hidroponía puede considerarse agricultura, el caso es menos claro para la acuicultura en instalaciones interiores sin conexión con el ciclo natural del agua. La definición de agricultura en la Sección 201 del Código de Construcción solo reconoce las pesquerías. Por lo tanto, la mayoría de los tribunales ven los sistemas de recirculación acuícola como empresas comerciales más que agrícolas. Recientemente, sin embargo, el tribunal administrativo de Hamburgo ha dictaminado que una planta para la producción de peces y crustáceos puede considerarse agrícola, si la mayoría del alimento requerido podría producirse teóricamente en las tierras agrícolas, pertenecientes a la granja, independientemente del tipo. de pescado producido, o si el alimento realmente se produce en la granja. Sin embargo, esta excepción podría no ser viable en los casos en que los piensos de origen agrícola no se utilizan en absoluto. En la práctica, las operaciones de acuicultura a menudo se establecían en conexión con plantas de biogás. Como los agricultores recibieron una bonificación adicional en la tarifa de alimentación para las plantas de cogeneración (es decir, plantas que también producen calor), hubo un incentivo para instalar una acuicultura que absorbe el calor junto a la planta de biogás.

Se pueden aplicar restricciones adicionales en áreas protegidas. La construcción de instalaciones acuícolas se considera problemática, especialmente adyacente a los cuerpos de agua naturales. Las excepciones para la agricultura solo están disponibles para las instalaciones existentes. Esto ha

creado una serie de problemas en las áreas tradicionales de pesca, como Mecklenburg, donde muchos pescadores profesionales tienen un interés y las habilidades necesarias para operar negocios auxiliares como la acuicultura o acuaponía (Paetsch 2013). Dado que los sistemas acuaponicos no dependen del ciclo natural del agua, podrían proporcionar una posibilidad creativa para una nueva empresa si sus beneficios fueran evaluados y reconocidos por las autoridades pertinentes.

Sin embargo, independientemente de su tamaño, las instalaciones de acuaponía no requieren una evaluación de impacto ambiental, que es solo un requisito para las granjas de peces que descargan desechos en las aguas superficiales.

20.2.1.2 Áreas urbanas

Muchos defensores visualizan la acuaponía como una posibilidad para la agricultura urbana, dado que se pueden construir instalaciones comerciales en los tejados o almacenes no utilizados para permitir la entrega directa de productos a los supermercados en los centros urbanos. Los sistemas semi-comerciales también se pueden ubicar en áreas residenciales (acuaponía de jardín). Según la ley de planificación alemana, el permiso de una instalación depende de su clasificación y El área donde se ubica. Las granjas comerciales de acuaponía pueden clasificarse como negocios comerciales u hortícolas. Como tal, generalmente no están permitidos en áreas residenciales. En los pueblos y áreas de uso mixto, se permiten empresas comerciales y hortícolas. En áreas comerciales e industriales, solo son posibles negocios comerciales, pero no hortícolas.

Como las instalaciones de acuaponía tienen relativamente pocos problemas de ruido y olor, pueden permitirse de manera excepcional incluso en áreas donde actualmente no son admisibles según las leyes de planificación. Sin embargo, obtener una excepción crea cargas administrativas adicionales e incertidumbre, lo que podría presentar un obstáculo para la ampliación de la tecnología. La planificación específica del proyecto permite la cooperación con las autoridades de planificación pero, en la práctica, solo es relevante para proyectos a gran escala debido a los costos involucrados.

Las plantas de acuaponía en el patio trasero pueden estar permitidas en todas las zonas bajo la excepción de instalaciones auxiliares para el mantenimiento de animales pequeños. Sin embargo, las instalaciones auxiliares deben ser no comerciales y son interpretadas de manera diferente por las diferentes autoridades del distrito. Algunos municipios adoptan un enfo-

que bastante restrictivo y solo permiten formas tradicionales de pequeños animales como perros, pollos, palomas, etc.

20.2.1.3 Ley de construcción

Los requisitos técnicos estructurales para los edificios y los procedimientos administrativos para obtener permisos de construcción están regulados por las regulaciones de construcción a nivel estatal, y si bien los códigos de construcción siguen, el llamado código modelo de construcción, puede haber diferencias sustanciales entre los estados.

Todos los productos de construcción deben cumplir con el Reglamento de la UE 305/2011, que requiere una Declaración de conformidad con las normas técnicas. Para pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales, se aplica la norma técnica EN 12566 CEN. Los sistemas de techo pueden requerir instalaciones especiales para la protección contra incendios y afectar los espacios libres mínimos. La estabilidad estática del edificio no debe verse afectada.

Aunque algunos de los componentes de una instalación de acuaponía, especialmente invernaderos o tanques de agua, no necesitan un permiso de construcción individual, la instalación de un sistema comercial de producción de alimentos generalmente requerirá un permiso de construcción, especialmente si el edificio ha servido a un edificio diferente propósito antes El procedimiento para obtener este permiso podría constituir un obstáculo administrativo y financiero significativo. Sin embargo, una vez obtenido, también se puede considerar que proporciona una mayor estabilidad para los inversores externos, dado que las regulaciones se considerarán cumplidas.

20.2.1.4 Ley del agua

Los sistemas acuaponicos no dependen necesariamente del uso de agua superficial idealmente, el agua sale de un sistema acuapónico solo por evapotranspiración o como agua retenida en los vegetales producidos. Argumentaríamos que tales instalaciones, por lo tanto, no deberían requerir un permiso bajo la ley del agua o las regulaciones de aguas residuales. Esto podría proporcionar una ventaja regulatoria en comparación, por ejemplo, con la acuicultura tradicional o la acuicultura, para las cuales las regulaciones cada vez más restrictivas de agua y aguas residuales constituyen un obstáculo significativo para las nuevas empresas los ahorros en las tarifas de descarga de aguas residuales presentan un incentivo para implementar dichos sistemas.

Sin embargo, no es totalmente seguro si los tribunales seguirían esta línea de argumentación el agua puede considerarse agua residual, en el momento en que se ha utilizado para la acuicultura. Entonces estaría sujeto a las normas sobre eliminación de aguas residuales, que generalmente requieren eliminación a través de instalaciones centralizadas. Por ejemplo, el Tribunal Administrativo Superior de Berlín rechazó recientemente el uso de una cama de lámina para limpiar las aguas grises y negras domésticas, donde la lámina se utilizó más tarde para el uso de energía. La corte declaró explícitamente que no existe el derecho al uso múltiple del agua bajo la Ley Alemana del Agua. En este caso, se requeriría un permiso especial para la eliminación descentralizada de aguas residuales, y toda la instalación de acuaponía tendría que cumplir con las normas sobre instalaciones de eliminación de aguas residuales.

El único desperdicio real producido en los sistemas de acuaponía es el lodo de filtro (que puede evitarse si se integra un ciclo adicional para la remineralización de este lodo o si el lodo se degrada en el sitio, por ejemplo, a través de la vermi-composición: si el lodo de filtro se puede usar en- sitio, no se requiere registro bajo la ley de fertilizantes (ver más abajo). Si se usa fuera de las instalaciones, se aplican las regulaciones relacionadas con la eliminación de residuos orgánicos o lodos de depuradora (más restrictivos). Los lodos de filtro se considerarían lodos de depuradora si el sistema de acuaponía en su conjunto se considera una planta de tratamiento de aguas residuales: queda por determinar si esto se aplica en la práctica.

20.2.1.5 Conclusiones sobre construcción

Las granjas de peces presentan pocos problemas con respecto al ruido y al olor. Por lo tanto, se podría suponer que los sistemas acuaponicos podrían permitirse con más facilidad que otras instalaciones de producción animal. Sin embargo, la acuaponía no encaja bien en el marco legal alemán.

Como la producción acuapónica no depende del uso del suelo, las instalaciones pueden no ser "suficientemente agrícolas" para las áreas periféricas, es decir, las tierras agrícolas. Por otro lado, la acuaponía podría ser "demasiado agrícola" para las zonas urbanas, ya que la agricultura urbana no se considera una categoría relevante según la ley de planificación alemana. En particular, la acuaponía puede ser generalmente inadmisible en áreas comerciales, industriales y residenciales.

Las instalaciones comerciales de acuaponía siempre requieren un permiso de construcción, incluso si están instaladas en edificios preexistentes que no requieren permisos de construcción nuevos.

Pioneros en acuaponía con proyectos urbanos muy visibles como ECF o Urban los agricultores parecen haberse adaptado bien al marco regulatorio existente sin embargo, los problemas de planificación de la ley podrían presentar un problema relevante para ampliar la tecnología, en cuyo caso los proyectos deben desarrollarse en estrecha consulta con las autoridades para evitar futuros conflictos y brindar seguridad a los inversores.

Una ventaja regulatoria importante de la acuaponía puede ser el hecho de que se producen pocas o ninguna agua residual, reduciendo así la necesidad de eliminar las aguas residuales. Se ha informado que los permisos y tarifas de aguas residuales son obstáculos importantes para los granjeros de peces convencionales. Como las tarifas de aguas residuales probablemente se calcularán de acuerdo con la carga de contaminación en el futuro, pueden constituir un incentivo aún más fuerte para pensar en tipos alternativos de eliminación de aguas residuales en el futuro (Schendel 2016). Sin embargo, como la ley del agua generalmente no proporciona usos múltiples, una aclaración legal sería muy importante para crear certeza para los productores.

Aparte de esto, las condiciones regulatorias en el sector del agua alemán no favorecen particularmente la innovación. La ley alemana del agua se adhiere estrictamente al paradigma de las aguas residuales centralizadas y, en general, no permite el reciclaje descentralizado de los flujos de materiales y otras formas de "ecología creativa". A diferencia del sector de residuos, donde el marco regulatorio ha dado fuertes incentivos al sector privado para considerar los residuos como un recurso, la regulación del sector de aguas residuales no crea incentivos para que el sector privado cree e implemente tecnologías innovadoras de reciclaje.

20.2.2 Reglamento sobre producción acuapónica

La producción de acuaponía está sujeta a regulaciones para la producción de plantas y animales en todas las etapas de producción y procesamiento. Bajo el enfoque regulatorio "de la granja a la mesa", muchas regulaciones relevantes se han armonizado a nivel europeo (especialmente a través del llamado paquete de higiene de la UE). Sin embargo, existen algunas exenciones para los pequeños productores que venden directamente a los clientes.

20.2.2.1 Producción hidropónica

La producción hidropónica está sujeta a relativamente pocas regulaciones: los medios de cultivo necesitan una aprobación de la UE. El uso de dese-

chos de pescado como fertilizante no requiere autorización bajo las leyes alemanas de fertilizantes si esos desechos de pescado se derivan de la acuicultura. Las restricciones más significativas se refieren al uso de pesticidas (nota: en los sistemas de acuaponía de ciclo único, el uso de pesticidas es inherentemente limitado debido a la toxicidad de los pesticidas para los peces; sin embargo, el uso de pesticidas es posible en sistemas acuaponicos de ciclos múltiples (desacoplados) donde el agua no regresa de las plantas a los componentes de pescado). La Ley Alemana de Protección Fitosanitaria generalmente impone el manejo integrado de plagas, lo que significa que las medidas preventivas y la promoción de mecanismos de respuesta natural (por ejemplo, ubicaciones adecuadas, sustratos, variedades, semillas y fertilizantes, así como medidas de control físico y biológico) tener prioridad antes del uso de pesticidas. El uso de especies invasoras para el control biológico de plagas está prohibido.

Los pesticidas solo pueden ser utilizados por personal calificado. Solo se pueden usar pesticidas aprobados bajo la regulación europea (CE) 1107/2009. El Reglamento (CE) 1107/2009 también incluye normas sobre el uso, almacenamiento y eliminación de pesticidas.

Antes de la cosecha, se deben observar ciertos períodos de espera. Los residuos de vegetales no pueden exceder ciertos límites máximos (LMR). La Dirección General de Salud y Consumidores (DG SANCO) proporciona una base de datos en línea gratuita de LMR.

20.2.2.2 Acuacultura

A diferencia de la horticultura, la acuicultura está cuidadosamente regulada, sin embargo, no existe una ley de acuicultura distinta a nivel nacional o europeo, y las leyes de pesca a nivel estatal solo regulan la pesca en cuerpos de agua naturales.

20.2.2.3 Cultivo de especies no nativas

Los peces más comúnmente cultivados en los sistemas de acuaponía son especies tropicales como la tilapia o el gato africano. Sin embargo, las reglas complejas del Reglamento (CE) 708/2007 sobre el uso de especies exóticas en la acuicultura generalmente no se aplican a las instalaciones de recirculación cerradas (registradas en un directorio de instalaciones de recirculación acuícola). Sin embargo, algunos países (por ejemplo, España y Portugal, pero no Alemania o Francia) han decidido prohibir algunos tipos de peces exóticos, lo que también afecta las posibilidades de cultivarlos en instalaciones cerradas.

20.2.2.4 Regulación sobre enfermedades de los peces en acuicultura

Todos los productores acuícolas están sujetos a la regulación alemana sobre enfermedades de peces, que implementa la Directiva Europea 2006/88 / CE sobre requisitos de salud animal para animales de acuicultura y sus productos y sobre la prevención y control de ciertas enfermedades en animales acuáticos (Ministerio de Agricultura de Baviera 2010) Bajo esta regulación, las operaciones de acuicultura generalmente requieren permisos de las autoridades veterinarias locales. Sin embargo, los productores que solo venden pequeñas cantidades de pescado directamente a los consumidores o minoristas locales solo necesitan registrar cierta información, como el nombre y la dirección, la ubicación y el tamaño de la operación, la fuente de suministro de agua, la cantidad de pescado retenida y las especies de peces. Lo que es más importante, la regulación sobre enfermedades de peces impone la obligación a los operadores de granjas de peces de informar a las autoridades veterinarias locales en caso de sospecha de un brote de enfermedad. Las autoridades veterinarias pueden implementar las medidas de control necesarias, que en algunos casos pueden implicar la destrucción de todo el stock en caso de preocupación por la propagación de la enfermedad.

Nota: La ley europea de sanidad animal, que anteriormente se regulaba de forma relativamente confusa en unos 400 actos individuales, está unificada bajo el Reglamento (UE) 2016/429. Sin embargo, el reglamento solo entra en vigor el 21 de abril 2021. El contenido relativo a las enfermedades de los peces no cambiará (Art. 173 et seq. Reglamento (UE) 2016/429).

20.2.2.5 Regulaciones sobre alimentación animal

La capacidad de obtener alimentos sostenibles para animales es un requisito previo clave para la producción sostenible de alimentos. En comparación con los animales terrestres, los peces tienen una tasa de conversión alimenticia mucho mejor; sin embargo, muchas especies de peces de alto nivel trófico requieren que una determinada porción de su alimento se derive de proteínas y grasas de origen animal (por ejemplo, harina de pescado). La alimentación de insectos o larvas de insectos al pescado a menudo se ve como una posible forma de aumentar la sostenibilidad de la acuicultura. Los insectos se pueden cultivar utilizando nutrientes orgánicos de desecho, en algunos casos derivados de desechos animales, incluidos los despojos.

Sin embargo, los animales para consumo humano no deben alimentarse con proteínas de origen animal (con la excepción de la proteína de pescado)

de acuerdo con el Reglamento (CE) 999/2001, que se implementó como reacción a la crisis de EEB en la década de 1990. Si bien a veces se argumenta que la prohibición de las fuentes de alimentación de la proteína animal no debería aplicarse a los insectos, que no se consideraron como posibles fuentes de alimentación en 2001, las autoridades veterinarias alemanas no permiten el uso de alimento para insectos.

Actualmente, algunos alimentos para mascotas ya se producen utilizando proteínas de insectos (por ejemplo, alimentos para perros de Tenetrio, una empresa emergente con sede en Brandenburgo). Dado el creciente interés en el uso de proteínas de insectos para la alimentación animal, se han realizado varios cambios legislativos a nivel europeo para permitir la alimentación de proteínas de insectos en función de las adaptaciones a los marcos regulatorios existentes (Smith y Pryor 2015). Desde 2017, está disponible un llamado perfil de riesgo de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) (EFSA Journal 2015; 13 (10): 4257). Los insectos pueden ser permitidos como alimento en la acuicultura a partir de 2018. Sin embargo, algunas restricciones permanecen vigentes: en particular los insectos que se utilizarán como alimento para animales no deben haberse alimentado de productos de desecho humanos o de rumiantes. La producción de insectos también plantea algunas cuestiones regulatorias abiertas adicionales, por ejemplo, cuestiones de bienestar relacionadas con los procedimientos estándar para matar.

20.2.2.6 Reglamento sobre bienestar animal

En comparación con otros animales, hay muy pocas regulaciones de bienestar animal (cap. 17) para el manejo y la matanza de peces. Aunque en general se acepta que los peces pueden sentir dolor, faltan pruebas científicas para justificar las restricciones al bienestar animal (Studer / Kalkınç 2001). A nivel europeo, solo hay unas pocas recomendaciones no vinculantes iniciadas en 2006 por la Comisión Europea. De acuerdo con el Artículo 22 de estas recomendaciones, para 2011 se anticipó una versión revisada basada en nueva evidencia científica, pero hasta la fecha la EFSA solo ha publicado recomendaciones específicas de especies para ciertos tipos de peces, así como disposiciones especiales sobre el transporte de peces. Artículo 25 encendido f - h. y el Anexo XIII del Reglamento (CE) 889/2008 sobre producción orgánica y etiquetado de productos orgánicos también contiene reglas específicas de especies sobre densidad de población. Como el etiquetado orgánico no está disponible para peces de acuicultura recirculatoria (ver más abajo), estas reglas no son relevantes para acuaponia. La mayoría de las normas de certificación privadas tampoco consideran los

aspectos de bienestar animal (Stamer 2009).

Según la Sección 11 de la ley alemana sobre bienestar animal, la cría de animales con fines comerciales generalmente requiere un permiso. Para obtener este permiso, se debe demostrar la capacitación adecuada o la experiencia profesional previa en la cría de animales y demostrar que el sistema de producción proporciona instalaciones nutricionales y de alojamiento adecuadas (Windstoßer 2011). Las operaciones se consideran comerciales cuando las ventas esperadas exceden los € 2000 por año.

De acuerdo con la Sección 11, párrafo 1, no. 8 TierSchG, no se necesita permiso para el mantenimiento comercial de "animales de granja". No está claro si los peces pueden considerarse animales de granja en este sentido. Las excepciones a la ley de bienestar animal generalmente se interpretan estrictamente: las especies solo se consideran animales de granja si las habilidades necesarias para mantenerlos se pueden adquirir en cualquier momento, en cualquier lugar y existe suficiente experiencia en cuanto al mantenimiento de una especie (Windstoßer 2011). Este puede no ser el caso para algunos tipos de peces tropicales que difieren fundamentalmente de las especies nativas (por ejemplo, Arapaima, cuyo uso en acuicultura se está explorando actualmente en IGB Berlín).

El Tribunal Administrativo de Colonia examinó recientemente los aspectos de bienestar animal al decidir sobre la admisibilidad de un llamado spa de peces, donde se mantenían los peces Kangal con el objetivo de usarlos para limpiar los pies humanos. Los operadores de este spa de peces pudieron demostrar a través de informes veterinarios que el bienestar de los animales no estaba siendo comprometido y, como tal, se les otorgó un permiso.

20.2.2.7 Reglamento sobre sacrificio de peces

El sacrificio de animales está regulado por el Reglamento Europeo (UE) 1099/2009, así como por el Decreto alemán de 20.12. 2012 (Gaceta de Leyes Federales I, p. 2982). Según el considerando 11 del Reglamento (UE) 1099/2009, los peces son fisiológicamente diferentes de los animales terrestres, por lo que los peces de cría pueden ser sacrificados y sacrificados con menos restricciones de bienestar animal, en este caso con implicaciones específicas para el proceso de inspección. Además, la investigación sobre el aturdimiento de peces está mucho menos desarrollada que para otras especies cultivadas. Deben establecerse normas separadas sobre la protección de los peces al matar. Por lo tanto, las disposiciones aplicables a los peces deberían, en la actualidad, limitarse al principio clave.

Bajo la regla general del art. 3 En la Sección 1 del Reglamento (UE) 1099/2009, los animales no sufrirán ningún dolor, angustia o sufrimiento evitable durante su matanza y operaciones relacionadas. Sin embargo, no existe una obligación explícita de aturdir antes del sacrificio. Dicho esto, los Estados miembros de la UE pueden mantener o adoptar normas nacionales destinadas a garantizar una protección más amplia de los animales en el momento de la matanza que las contenidas en este Reglamento (Art. 26). Por ejemplo, en Alemania, el sacrificio de peces está sujeto a condiciones más estrictas que los impuestos por el Reglamento (UE) 1099/2009: como tal, todos los tipos de peces, excepto los peces planos y las anguilas, deben ser aturdidos antes de matarlos. Los que matan necesitan un certificado de competencia. Los métodos de aturdimiento apropiados pueden diferir de una especie a otra, con implicaciones para los productores: en Suiza, el productor de acuicultura habría tenido que cerrar su operación ya que las autoridades veterinarias locales no le permitieron aturdir usando el método de agua helada, que estaba empleando. La definición de métodos de matanza apropiados para diferentes especies de peces es el tema de un proyecto de investigación en curso financiado por BLE en la Universidad de Medicina Veterinaria de Hannover y puede conducir a regulaciones más restrictivas en el futuro.

Los aspectos de bienestar animal también pueden restringir ciertas formas de comercialización y venta de pescado. Por ejemplo, el Tribunal Administrativo Superior de Bremen ha prohibido la colocación de peces de cultivo en estanques, desde los cuales los pescadores recreativos los arrojarían, ya que esto se consideraba "innecesariamente perjudicial".

20.2.2.8 Reglamento sobre formación profesional de piscicultores

La regulación federal alemana sobre la formación profesional de los piscicultores no menciona la acuaponía. Algunas empresas privadas ofrecen cursos sobre acuaponía en el mercado alemán. Sin embargo, no está claro si dichos cursos se consideran suficientes para obtener los permisos necesarios (por ejemplo, para uso de pesticidas, mantenimiento comercial de animales, sacrificio, etc.).

20.2.2.9 Ley de higiene

La ley de higiene está armonizada a nivel europeo a través del Reglamento (CE) 852 /2004, 853/2004 y 854/2004.

Como regla general, todos los operadores de empresas alimentarias, independientemente del producto, deben cumplir con la ley de higiene de la UE.

Como tales, deben cumplir con las normas generales de higiene y gestión en los anexos I y II del Reglamento 852/2004, incluidos los requisitos básicos sobre los procesos de producción y la higiene personal, así como el tratamiento adecuado de los residuos. Deben mantener un registro del origen de los alimentos para animales, así como el uso de pesticidas y medicamentos veterinarios. Las medidas para evitar riesgos deben documentarse de manera adecuada. De acuerdo con el Anexo II, Capítulo IX no. 3 del Reglamento (CE) 852/2004, los alimentos deben protegerse contra cualquier contaminación en todas las etapas de producción, procesamiento y distribución. Según el Reglamento (CE) no 178/2002, la contaminación puede referirse a cualquier agente biológico, químico o físico en un alimento o en una condición de un producto alimenticio, que puede causar efectos adversos para la salud. Los operadores de empresas alimentarias deben implementar y mantener un sistema HACCP (análisis de peligros y puntos críticos de control), que debe ser certificado por organismos de certificación acreditados. Los detalles se acuerdan con las autoridades locales.

La legislación de higiene de la UE no se aplica al suministro directo de pequeñas cantidades de productos primarios al consumidor final o a establecimientos minoristas locales. Las cantidades pequeñas se definen como cantidades de los hogares para entrega directa a los consumidores o para el comercio minorista local como para el consumo diario habitual. La producción primaria en el caso de los peces incluye la captura, sacrificio, sangrado, rumbo, destripamiento, eliminación de aletas, refrigerio y envoltura. Actividades como la congelación de flash, el llenado, el envasado al vacío o el ahumado darán como resultado que el pescado ya no se considere producción local primaria. Según la ley alemana, existen ciertas restricciones sobre la higiene de los alimentos, incluso para los proveedores locales directos de alimentos (Anexo 1 LMHV).

Los requisitos de registro o autorización del Reglamento (CE) no 853/2004 dependen del volumen y el tipo de procesamiento. No se requiere registro ni autorización para el suministro de productos primarios en cantidades domésticas directamente en el lugar de producción, procesamiento o almacenamiento (incluidos los mercados cercanos). También es posible suministrar establecimientos minoristas (supermercados, restaurantes), consumidores o restaurantes en un radio de 100 km. Si los productos primarios se entregan a consumidores finales o a restaurantes en grandes cantidades, la empresa debe registrarse y demostrar su capacidad para cumplir con los requisitos de higiene de los alimentos. Si más de un tercio de los productos derivados de animales se venden a puntos de venta minoristas fuera de la región (radio de 100 km), también se requiere una licencia de salud pública.

20.2.2.10 Conclusiones sobre producción

Los requisitos legales para la producción de acuaponía no son más altos que para la producción de pescado o vegetales. Sin embargo, la gran cantidad de leyes aplicables refleja la complejidad de la acuaponía. En comparación con la ganadería, la acuicultura puede parecer menos regulada, especialmente en el área de la ley de bienestar animal. Sin embargo, las "áreas grises" legales y la incertidumbre correspondiente no siempre son ventajosas para los productores.

Sin las prácticas administrativas establecidas, existe un riesgo considerable de conflictos (c.f. para el caso citado en Suiza, donde se cerró una operación de acuicultura, porque no se permitió al productor matar al pez de maneras específicas). Además, la gran cantidad de regulaciones aplicables puede ser onerosa, especialmente cuando coexisten las regulaciones europeas y nacionales (por ejemplo, sobre bienestar o higiene de los animales). Como no existe una ley armonizada sobre acuicultura en Alemania, los productores necesitan varios permisos de diferentes autoridades. Las autoridades a menudo tienen poca experiencia con la acuicultura no tradicional y, como tal, los requisitos administrativos inciertos pueden ser desalentadores para los empresarios. Dada la relativa novedad de la acuaponía comercial, se recomienda encarecidamente a los productores potenciales que se pongan en contacto con las autoridades locales en una etapa temprana. En el caso de plantas comerciales más grandes, los operadores probablemente deberían contactar a las autoridades veterinarias y de higiene antes de comenzar la construcción. Los requisitos cada vez más estrictos de las leyes de higiene europeas también pueden constituir una carga significativa, especialmente para las pequeñas empresas que desean comercializar directamente a los consumidores o restaurantes locales (Schulz et al. 2013). Sin embargo, queda por determinar si las exenciones para los vendedores directos son de ayuda práctica para los operadores de acuaponia. Las pocas instalaciones de acuaponia existentes en Alemania demuestran actualmente la necesidad de que los productores dependan de una variedad de canales de venta y la necesidad de crear diversas formas de ingresos auxiliares (visitas guiadas, procesamiento secundario, clases de cocina, etc.). Por lo tanto, las exenciones para la venta directa pueden ser irrelevantes si se deben cumplir las normas de higiene por otros motivos.

20.2.3 Comercialización

La comercialización de productos acuaponicos se ve afectada por diferentes regímenes regulatorios. Las regulaciones de higiene no solo se refieren a la producción de alimentos, sino también a la venta de alimentos (ver

arriba). Las leyes comerciales y fiscales, las reglamentaciones de etiquetado o las certificaciones especiales, como las reglamentaciones de etiquetado orgánico de la UE, también pueden ser relevantes.

20.2.3.1 Derecho comercial y fiscal

La legislación comercial alemana privilegia la agricultura de varias maneras: la comercialización de productos agrícolas de producción propia a través de tiendas agrícolas, del campo o de un puesto en el mercado, no se considera un negocio según la ley alemana y, por lo tanto, no requiere registro. Esta excepción se extiende a la primera etapa de procesamiento, es decir, limpieza y destripado, llenado y ahumado en el caso de pescado, o en el caso de frutas y verduras, pelado, picado, cocción, así como la producción de jugos y vino (Cámara de Agricultura Renania-Palatinado 2015).

La venta directa de productos agrícolas también está exenta de restricciones legales sobre los horarios de apertura y la prohibición de las ventas dominicales. Sin embargo, considerando los bajos costos y los bajos requisitos administrativos de un registro comercial, estos privilegios pueden no constituir una ventaja relevante.

Los privilegios fiscales para la producción agrícola pueden ser de mayor importancia práctica. Independientemente del tamaño, las operaciones de acuicultura están sujetas a la denominada tasa impositiva del IVA de tasa promedio, que ofrece una tasa efectiva muy reducida de impuesto al valor agregado que permite a los productores locales vender a precios más competitivos en relación con las importaciones internacionales.

En el código del impuesto sobre la renta, existen privilegios considerables para las "pequeñas granjas" (es decir, volumen de negocios <500,000 €, tamaño de granja <20 hectáreas sin usos especiales). Si se respetan ciertos límites de área (600 m^2 de hortalizas bajo vidrio, 1600 m^2 de estanques), los ingresos de la acuicultura y el cultivo de hortalizas no se gravan en absoluto; incluso si las áreas cultivadas exceden estos límites, las tasas impositivas efectivas son extremadamente bajas. Como resultado, la operación de acuaponía para pequeños agricultores podría considerarse esencialmente libre de impuestos.

20.2.3.2 Regulaciones sobre etiquetado de alimentos

Las normas sobre etiquetado de alimentos se han armonizado en gran medida a nivel europeo a través del Reglamento Europeo 1169/2011 sobre el envasado de alimentos. Además de las reglas formales, sin embargo, los

estándares de etiquetado voluntario juegan un papel aún más importante en el mercado (ver Sodano et al. 2008). En el caso de la etiqueta orgánica de la UE, la norma voluntaria también está regulada por la ley. En otros casos, se deben seguir las reglas de los esquemas de certificación privada.

20.2.3.3 Reglas generales de etiquetado

Las reglas generales para la venta de productos envasados se establecen en el Reglamento Europeo 1169/2011 (por ejemplo, el deber de incluir una lista de ingredientes, etc.). Como regla general, el art. 7 párr. 1 El Reglamento (UE) 1169/2011 prohíbe las declaraciones engañosas sobre el envasado de alimentos.

Además de estas reglas generales, el Reglamento (UE) 1379/2013 contiene reglas especiales sobre la información del consumidor con respecto a los productos de la acuicultura. Por ejemplo, en virtud del art. 38 del Reglamento (UE) 1379/2013, el estado miembro o el tercer país, en el que el producto de la acuicultura ha adquirido más de la mitad de su peso final, debe estar correctamente nombrado en la etiqueta.

20.2.3.4 Reglamento orgánico de la UE

Los productos de acuaponía no son elegibles para ser etiquetados como orgánicos según las regulaciones actuales de la UE para productos orgánicos. El Artículo 4, Reglamento (CE) 889/2008, prohíbe explícitamente el uso de hidroponía en la agricultura ecológica. El considerando 4 establece que la producción de cultivos orgánicos / biológicos se basa en el principio de que las plantas obtienen sus alimentos principalmente del ecosistema del suelo. Para productos acuícolas, el art. 25 g El Reglamento (CE) 710/2009 prohíbe el uso de sistemas de circuito cerrado, y de acuerdo con el considerando 11 del Reglamento (CE) 710/2009, esto se desprende del principio de que orgánico la producción debe ser lo más cercana posible a la naturaleza. Estas reglas no cambiarán en el nuevo reglamento de etiquetado orgánico de la UE adoptado en 2018, que entrará en vigor en 2021. Las leyes que impiden la certificación orgánica de productos hidropónicos no son compartidas por países como los EE. UU. Y Australia, donde los productos hidropónicos / acuaponicos pueden certificarse como orgánicos.

20.2.3.5 Etiquetas privadas

Aunque actualmente no hay esquemas de certificación específicos para acuaponía, pero aun así hay varias certificaciones disponibles para la acuicultura. Las certificaciones privadas generalmente se "otorgan" por un

cierto período de tiempo, si ciertas entidades privadas de certificación pueden verificar que las producciones cumplen con los criterios definidos por su estándar de etiquetado. Los esquemas de etiquetado privado generalmente son puramente contractuales, con estándares establecidos por instituciones privadas, que están sujetos solo a obligaciones legales generales (por ejemplo, ley antimonopolio). Si bien el diseño de sistemas de certificación está cada vez más en el ámbito de la legislación europea, incluida la certificación para la acuicultura (véase el informe de la Comisión sobre las opciones con respecto a la asignación de la etiqueta ecológica de la UE para los productos de la pesca y la acuicultura desde el 18/05/2016, COM ver. 2016) 263 final), hasta la fecha no existen obligaciones concretas para los sistemas de etiquetado de la acuicultura en virtud de la legislación europea.

Los esquemas de etiquetado son esenciales, especialmente en las relaciones entre empresas (B2B) entre productores / procesadores y minoristas. Sin embargo, cada vez más, la certifi cación también juega un papel en la comercialización para consumidores finales (B2C). Además de los aspectos cualitativos, B2C a menudo certifica el cumplimiento de ciertas normas ambientales y sociales. Los esquemas de certificación pueden variar mucho en estándares, modalidades de verificación y costo.

Entre los esquemas de certificación existentes, el Consejo de Administración de Acuicultura (ASC) puede ser el más relevante para los productores de acuaponía. Esta certificación ha sido otorgada por el Consejo de Administración de Acuicultura (ASC) desde 2010, como complemento del programa más conocido del Consejo de Administración Marina (MSC). El ASC es una organización formalmente independiente, privada, sin fines de lucro, iniciada por el WWF y responsable de desarrollar estándares de calidad, éticos y de sostenibilidad con aportes científicos. Las empresas privadas de certificación (por ejemplo, en Alemania TÜV NORD) están acreditadas por el ASC para confirmar el cumplimiento de estas normas. Actualmente existen normas ASC para las siguientes especies: abulón, trucha, camarones, salmón, almejas, peces gato y tilapia.

Las normas, los manuales de auditoría y las listas de verificación de preparación de auditorías están disponibles gratuitamente en el sitio web de ASC, y los procedimientos estandarizados también se han hecho públicos. El estándar ASC tiene diferentes prioridades, por ejemplo, para la etiqueta orgánica de la UE (por ejemplo, el alimento para animales a base de OGM no está prohibido bajo ASC).

El sistema de certificación y garantía de calidad GLOBAL G.A.P también ofrece certificaciones de acuicultura. Mientras GLOBAL G.A.P. general-

mente se enfoca en la certificación B2B para el aseguramiento de la calidad en el sector minorista de alimentos, también se otorga una etiqueta de consumidor llamada GGN para peces de cultivo y se usa a menudo, por ejemplo, para peces que no son elegibles para la certificación orgánica porque son capturados o producidos en el medio silvestre acuaponía. Los consumidores pueden acceder a la información a través de www.my-shsh.info.

20.2.3.6 Organizaciones de mercado

El Reglamento (UE) 1379/2013 sobre la organización común de mercados de productos de la pesca y la acuicultura contiene normas detalladas sobre el establecimiento, reconocimiento, objetivos y acciones de organizaciones profesionales, es decir, organizaciones de productores (Art. 6 y siguientes) y entre sucursales. organizaciones (art. 11 y ss.).

De acuerdo con el Artículo 8 (3) del Reglamento (UE) 1379/2013, las organizaciones de productores en el campo de la acuicultura pueden, entre otras cosas, utilizar las siguientes medidas: promover la acuicultura sostenible, especialmente en términos de protección del medio ambiente, salud animal y bienestar de los animales; recopilación de información sobre productos comercializados, incluida información económica sobre pronósticos de ventas y producción; recolectar información ambiental; planificar la gestión de las actividades acuícolas de sus miembros; y programas de apoyo para profesionales para promover productos acuícolas sostenibles. De acuerdo con el artículo 15 del Reglamento 1379/2013, las organizaciones de productores también pueden recibir apoyo financiero de las políticas marítimas y pesqueras de la UE.

Las medidas tomadas por las organizaciones interprofesionales incluyen, por ejemplo, la promoción de productos acuícolas de la Unión Europea de manera no discriminatoria mediante, por ejemplo, la certificación y denominaciones de origen, sellos de calidad, designaciones geográficas, especialidades tradicionales garantizadas. y méritos de sostenibilidad (Art. 13 encendió un Reglamento 1379/2013). Las organizaciones interprofesionales pueden adoptar normas para la producción y comercialización de productos acuícolas que sean más estrictas que las disposiciones de la Unión Europea o la legislación nacional (Art. 13 lit c Reglamento 1379/2013).

El reconocimiento como organización de productores puede tener consecuencias de largo alcance; Los estados miembros pueden, bajo ciertas condiciones, hacer que las reglas acordadas dentro de una organización de productores sean vinculantes para todos los productores en el área (Art. 22 Reglamento 1379/2013).

Además, los acuerdos, decisiones o prácticas concertadas acordadas dentro de una organización entre sucursales pueden ser vinculantes para otros operadores (artículo 23 del Reglamento 1379/2013). De acuerdo con el art. 41 VO 1379/2013, las organizaciones de productores están en gran parte exentas de la ley antimonopolio.

Hasta el momento, no hay asociaciones profesionales en el campo de la acuaponía en la Asociación Europea de Organizaciones de Productores de Pescado (EAPO). Sin embargo, en 2018 se fundó una asociación para acuaponía en Alemania (http: // bundes verband - aquaponi k.de/), y una Asociación de acuaponía de la UE (EUAA) con sede en Viena se fundó por iniciativa de varias partes interesadas reunidas en la acción COST de la UE.

20.2.3.7 Conclusiones sobre comercialización

En términos de derecho comercial y tributario, existen varios privilegios que los operadores de acuaponía podrían explotar teóricamente. Los beneficios fiscales podrían ser especialmente interesantes para los inversores externos. Sin embargo, queda por ver si ciertas condiciones con respecto a la forma legal de una empresa y los volúmenes de inversión requeridos impiden a los operadores reclamar estos beneficios. Hasta ahora, los proyectos de acuaponía urbana más conocidos en Alemania no han sido rentables, por lo que no ha surgido el problema del pago de impuestos. Según las leyes comerciales y fiscales, los umbrales para los privilegios de las instalaciones a pequeña escala y los vendedores directos no son congruentes con los umbrales establecidos por la ley de higiene. Por lo tanto, se requiere una revisión detallada de los conceptos operativos y de marketing en cada caso individual. La etiqueta orgánica de la UE está actualmente fuera de discusión para los productos acuaponicos. Sin embargo, hay cada vez más oportunidades privadas para la certificación.

20.3 ACUAPONÍA Y POLÍTICAS DE LA UE

Las políticas nacionales solo pueden analizarse para cada país individual. Por lo tanto, nos concentramos en las políticas pertinentes de la UE.

20.3.1 Resumen de las políticas relevantes de la UE

La Política Pesquera Común (PPC) y la Política Agrícola Común (PAC) se aplican a los componentes de acuicultura e hidroponía de la acuaponía, respectivamente (Comisión Europea 2012, Comisión Europea 2013). También se aplican políticas sobre seguridad alimentaria, salud y bienestar animal, sanidad vegetal y medio ambiente (desechos y agua).

20.3.1.1 Política agrícola común

La Política de Desarrollo Rural, también conocida como el segundo pilar de la PAC, se centra en aumentar la competitividad y promover la innovación (Ragonnaud 2017).

Cada estado miembro tiene al menos un programa de desarrollo rural. La mayoría de los países han establecido objetivos para proporcionar capacitación, reestructurar y modernizar las granjas existentes, establecer nuevas granjas y reducir las emisiones. Las medidas contra el uso excesivo de fertilizantes inorgánicos se introdujeron en la PAC, así como en las políticas ambientales, y están reguladas por la Directiva de Nitratos de la UE (Directiva 91/676 / CEE 1991) y la Directiva Marco del Agua (DMA).

20.3.1.2 Política pesquera común

La reforma de la PPC y las directrices estratégicas para el desarrollo sostenible de la acuicultura de la UE fueron emitidas por la Comisión para ayudar a los países y partes interesadas de la UE con los desafíos que enfrenta el sector. El énfasis está en facilitar la implementación de la Directiva Marco del Agua en lo que se refiere a la acuicultura (Comisión Europea 2013).

La PPC requiere el desarrollo de un plan estratégico nacional plurianual en cada estado miembro con estrategias para promover y desarrollar el sector de la acuicultura (Comisión Europea 2016). Teniendo en cuenta sus diferentes historias y especies cultivadas, cada estado miembro puede apoyar sus tecnologías de acuicultura existentes, pero también desarrollar otras nuevas, como la acuaponía. Esta estrategia debería conducir a un aumento en la producción y reducciones en la dependencia de las importaciones. Las principales acciones planificadas por los Estados miembros son la simplificación de los procedimientos administrativos, la planificación espacial coordinada, la mejora de la competitividad y la promoción de la investigación y el desarrollo.

En el marco de la PPC, se ha establecido un Consejo Asesor de Acuicultura (AAC). El objetivo principal de la AAC es proporcionar asesoramiento y recomendaciones a las instituciones europeas y los Estados miembros sobre cuestiones relacionadas con el desarrollo sostenible del sector de la acuicultura (Sheil 2013).

Un objetivo de CFP y CAP es aumentar la competitividad y la sostenibilidad de la acuicultura y la agricultura, respectivamente (Massot 2017). Uno

de los objetivos en la PPC es explotar la ventaja competitiva mediante la obtención de estándares de producción de alta calidad, salud y medio ambiente.

20.3.1.3 Política de seguridad alimentaria de la UE

El objetivo de la política de seguridad alimentaria de la UE es garantizar alimentos seguros y nutritivos a partir de animales y plantas sanos, al tiempo que se apoya a la industria alimentaria (Comisión Europea 2014). La política integrada de seguridad alimentaria también incluye el bienestar animal y la sanidad vegetal. En la estrategia para el bienestar animal, hay una acción sobre el bienestar de los peces de cultivo; sin embargo, no hay reglas específicas establecidas (Comisión Europea 2012).

20.3.1.4 Políticas ambientales

Los impactos ambientales de la acuicultura están regulados bajo una serie de requisitos legales de la UE, incluida la calidad del agua, la biodiversidad y la contaminación. Las políticas ambientales relevantes para los operadores de acuaponia son la estrategia de prevención y reciclaje de residuos (Comisión Europea 2011) y el séptimo Programa de Acción Ambiental (PEA) bajo la Política Ambiental de la UE (Unión Europea 2014).

20.3.2 Cómo la acuaponía puede contribuir a los objetivos en las políticas y estrategias de la UE

La acuaponía puede contribuir a los objetivos de desarrollo mencionados en estas políticas, siendo los factores principales la reducción del uso del agua y los desechos de la producción de peces a través del reciclaje de nutrientes. El agua descargada se convierte en un recurso y los desechos sólidos se pueden actualizar como fertilizantes para plantas. Debido a que la acuaponía moderna se basa en sistemas de recirculación de la acuicultura, estas operaciones son relativamente independientes de su ubicación y pueden contribuir a la producción regional de alimentos y cadenas de valor, incluso en las zonas urbanas. Los sistemas de acuicultura abierta tienen limitaciones: uso de recursos hídricos, contaminación, reducción localizada de la biodiversidad bentónica, dragado significativo de cuerpos de agua, modificación física de la tierra, cambios en el flujo de agua e introducción de especies exóticas (Unión Europea 2016). Sin embargo, la mitigación de la mayoría de las restricciones es posible en los sistemas de acuaponía. En comparación con los sistemas hidropónicos, la acuaponía reduce el uso de fertilizantes minerales, a menudo extraídos de manera insostenible.

Una de las prioridades en las directrices estratégicas sobre acuicultura es mejorar el acceso al espacio y al agua (Comisión Europea 2013). La competencia entre las diferentes partes interesadas y, a menudo, las estrictas normas medioambientales limitan el desarrollo de sistemas de acuicultura abiertos dentro de la UE. Sin embargo, los sistemas de acuaponía se pueden ubicar en casi cualquier lugar, incluidos los desiertos y el suelo degradado y las islas arenosas y saladas, ya que un circuito cerrado utiliza un mínimo de agua. Por lo tanto, puede utilizar un espacio que no sea adecuado para otros sistemas de producción de alimentos, como tejados, sitios industriales abandonados y, en general, tierras no cultivables o contaminadas. Dado que la acuaponía reutiliza el 90-95% del agua, depende mucho menos de la disponibilidad de agua en comparación con otros sistemas como la acuicultura abierta, la hidroponía y la agricultura de riego.

Al igual que en los sistemas de recirculación de la acuicultura, un beneficio de los sistemas comerciales de acuaponia más grandes es la posibilidad de obtener un alto nivel de bioseguridad, en el que las condiciones ambientales se pueden controlar por completo para garantizar un ambiente saludable para los peces (Badiola et al. 2012), minimizando así el riesgo de enfermedades y brotes de parásitos (Yanong y Erlacher-Reid 2012). Debido al mayor control sobre la producción, el riesgo de pérdidas es menor (Yanong y Erlacher-Reid 2012), lo que puede proporcionar a los agricultores acuaponicos una ventaja competitiva sobre los agricultores tradicionales. Por otro lado, el uso de una fuente de nitrógeno para cultivar dos productos (Somerville et al. 2014) aumenta el riesgo de inversión, ya que tanto el pescado como la producción de la planta deben maximizarse para obtener ganancias. Sin embargo, si esto se hace con éxito, combinado con las percepciones positivas en los mercados occidentales de productos más amigables con el medio ambiente, se pueden lograr altos ingresos (Somerville et al. 2014).

Un objetivo en la estrategia de prevención y reciclaje de residuos (Comisión Europea 2011) incluye la introducción del pensamiento del ciclo de vida que considera una variedad de impactos ambientales. Menciona que la prevención de los desechos es la prioridad, seguida de la reutilización, el reciclaje, la recuperación y la última eliminación. Además, una de las áreas prioritarias en la séptima EAP apunta a la transformación de la UE en una economía eficiente en recursos y baja en carbono, con un enfoque especial en el uso de los residuos como recurso (Unión Europea 2014). Los sistemas de acuaponía minimizan la producción de residuos (Goddek et al. 2015). El agua en los sistemas de acuaponía se recircula, por lo que las aguas residuales se minimizan. Al usar el agua de proceso de peces para la nutrición de las plantas, los desechos orgánicos de la acuicultura se reutilizan en el com-

ponente hidropónico del sistema de acuaponía. Los desechos sólidos producidos en un sistema de acuaponía pueden mineralizarse y devolverse al sistema o utilizarse como compost para la agricultura basada en el suelo. La acuaponía también promueve la producción local de alimentos, minimizando así los costos de transporte. Por último, al colocar las granjas de acuaponía en entornos urbanos, puede proporcionar valor ecológico en las ciudades y desempeñar un papel en la adaptación al cambio climático.

20.3.3 Apoyo financiero de la UE

El Séptimo Programa Marco (en el marco financiero plurianual de la Comisión Europea) financió un par de proyectos relacionados con la acuaponía. El Programa Marco de la UE Horizonte 2020 (desafío 2 "Seguridad alimentaria, agricultura y silvicultura sostenibles, investigación marina y marítima y de aguas continentales, y la bioeconomía" y desafío 5 "Acción climática, medio ambiente, eficiencia de recursos y materias primas") proporciona financiación a varios Iniciativas de acuaponia, incluida la Acción COST (Cooperación Europea en Ciencia y Tecnología) FA1305 "El Centro de acuaponía de la UE: Realización de una producción sostenible integrada de pescado y verduras para la UE" para promover la innovación y el desarrollo de capacidades por parte de una red de investigadores y empresas comerciales de acuaponía.

Otras posibles oportunidades de financiación para proyectos de desarrollo hidropónico en el marco financiero plurianual de la Comisión Europea incluyen la Asociación Europea de Innovación, Productividad y Sostenibilidad Agrícolas (EIP-AGRI), una asociación de investigación e innovación UE-África a largo plazo sobre seguridad alimentaria y nutricional y agricultura sostenible (LEAP-AGRI), el Instrumento piloto del Consejo Europeo de Innovación para Pequeñas y Medianas Empresas (Instrumento PYME), el ERANET MED Iniciativa Asociación de Investigación e Innovación en el Área Mediterránea (PRIMA), y el Marítimo Europeo y la Pesca Fund (EMFF). El EMFF puede apoyar a instituciones de investigación y universidades, así como a empresas; sin embargo, requiere diferentes tasas de cofinanciación.

20.3.4 Conclusiones sobre el panorama político general de la UE

Ninguna de las políticas y directrices de la UE hasta ahora menciona explícitamente la acuaponía. Según la DG MARE, las regulaciones sobre acuaponía deben resolverse dentro de los estados miembros individuales (COST Action FA1305 2017), por ejemplo, involucrando acciones resultantes de los respectivos planes estratégicos nacionales. Aunque no existe un

marco explícito de la UE para acuaponía, es un sistema agrícola innovador que puede contribuir a muchas prioridades establecidas a través de las políticas y estrategias de la UE. El apoyo de la UE a través de medidas financieras está ayudando a un mayor desarrollo de la tecnología. Sin embargo, esto apunta principalmente a proyectos de investigación, mientras que el sector también necesita asistencia para el desarrollo comercial a través del apoyo de proyectos de prueba de concepto. De hecho, hasta el momento hay muy pocos sistemas comerciales exitosos de acuaponía que operen en la UE, por lo que actualmente podría no ser necesaria una política de acuaponía. Sin embargo, en última instancia, reconocer y cubrir la tecnología en las políticas existentes será beneficioso para el desarrollo del sector.

20.4 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICA

La acuaponía no solo se encuentra en el nexo de diferentes tecnologías, sino también en el nexo de diferentes campos regulatorios y de políticas. Si bien puede proporcionar soluciones a varios objetivos de sostenibilidad, parece caer en las grietas entre las categorías legales y políticas establecidas. Para agregar a la complejidad, el desarrollo de la acuaponía se ve afectado por la regulación de los diferentes niveles de gobierno. Por ejemplo, la facilitación de la agricultura urbana debe provenir del nivel nacional o incluso subnacional, ya que la UE no tiene competencia en la planificación de la ley. Los principales incentivos regulatorios para la implementación de la tecnología acuaponica probablemente podrían establecerse en la legislación del agua, que es competencia nacional y de la UE.

La implementación de la acuaponía podría ganar una tracción significativa, si las operaciones de acuicultura tuvieran la obligación o al menos incentivos financieros para tratar con las aguas residuales. Sin embargo, esto requeriría un cambio importante en el enfoque regulatorio actual.

En la teoría sobre los sistemas de innovación tecnológica (TIS), una "alineación institucional" en la fase formativa de un TIS se considera crítica. Solo si las instituciones están suficientemente alineadas, los mercados se formarán y proporcionarán espacio para el emprendimiento experimentación para determinar caminos comercialmente viables para implementar la tecnología (Bergek et al. 2008). Para que tenga lugar la alineación institucional, los defensores de la nueva tecnología deben estar suficientemente organizados para contribuir a un proceso de "legitimación" de su tecnología (Koenig et al. 2018).

Como primer paso, por lo tanto, recomendamos que los proponentes se

acerquen, creen y fortalezcan los vínculos con varios interesados y entre ellos en las comunidades profesionales relevantes para construir un caso para hacer de la acuaponía una actividad legítima. La recién fundada Asociación de acuaponía de la UE podría desempeñar un papel importante en este proceso. Un paso más podría ser el desarrollo de estándares certificables en cooperación con los sistemas de certificación establecidos. Con la actual falta de un marco legal coherente, tales estándares darían a los productores, consumidores, administradores y otras partes relevantes (por ejemplo, inversores externos o aseguradores, que dudan de la seguridad de los productos acuaponicos) un marco para comprender la calidad y riesgos Dichas normas podrían adaptarse flexiblemente a las demandas prácticas de los productores. Eventualmente, las regulaciones formales podrían basarse en tales estándares, como lo hacen en otros dominios regulatorios.

A nivel europeo, las partes interesadas deben presionar por un mayor reconocimiento de los beneficios potenciales de la acuaponía en diferentes áreas de política. La UE debe proporcionar un apoyo financiero crítico, ya que la implementación comercial de acuaponía todavía está en pañales. La UE también debería proporcionar un foro para el intercambio de mejores prácticas para cuestiones regulatorias como la construcción y las aguas residuales que caen bajo la competencia de los Estados miembros.

A nivel nacional, las partes interesadas deben impulsar un marco regulatorio coherente y accesible que se adapte a las realidades de la acuicultura moderna y establezca incentivos para la "ecología creativa". Incluso podrían lograrse avances significativos a nivel subnacional, donde la resistencia política puede superarse más fácilmente. La investigación adicional debería concentrarse en las estrategias reguladoras de diferentes países para identificar las mejores prácticas.

REFERENCIAS

Badiola M, Mendiola D, Bostock J (2012) Recirculating Aquaculture Systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges. Aquac Eng 51:26–35. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004

Bergek A, Jacobsson S, Carlsson B, Lindmark S, Rickne A (2008) Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: a scheme of analysis. Res Policy 3(37):407–429

COST Action FA1305 (2017) Report on a Workshop with representatives from DG MARE, DG AGRI and DG RTD. 5 p. Available online: http://euaquaponicshub.com/hub/wp-content/uploads/2017/07/Workshop-notes.pdf

Directive 91/676/EEC (1991) Council Directive of 12 December 1991 con-

cerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Off J Eur Communities 8 p. Available online: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri¼celex:31991L0676

European Commission (2011) Report from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on the Thematic Strategy on the Prevention and Recycling of Waste. 11 p

European Commission (2012) Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European Economic and social committee and the committee on the European Union Strategy for the Protection and Welfare of Animals 2012–2015. 12 p. Available online: https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/animals/docs/aw_eu_strategy_19012012_en.pdf

European Commission (2013) Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European Economic and social committee and the committee of the regions; Strategic guidelines for the sustainable development of EU aquaculture. 12 p. Available online: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri¼CELEX:52013DC0229&from¼EN

European Commission (2014) The European Union explained -food safety. 16 p. Available online: https://europa.eu/european-union/topics/food-safety_en

European Commission (2016) Summary of the 27 Multiannual national aquaculture plans. 12 p. Available online: https://ec.europa.eu/fisheries/sites/fisheries/files/docs/body/27-multiannual- national-aquaculture-plans-summary_en.pdf

European Union (2012) The common agricultural policy-a story to be continued. Publicaetions Office of the European Union. 23 p. Available online: http://ec.europa.eu/agriculture/50-years- of-cap/files/history/history_book_lr_en.pdf

European Union (2014) Living well, within the limits of our planet, 7th EAP-The new general Union Environment Action Programme to 2020. 4 p. Available online: http://ec.europa.eu/ environment/pubs/pdf/factsheets/7eap/en.pdf

European Union (2016) Commission staff working document on the application of the Water Framework Directive (WFD) and the Marine Strategy Framework Directive (MSFD) in relation to aquaculture. 36 p. Available online: http://ec.europa.eu/environment/marine/pdf/SWD_2016_178.pdf

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://

doi.org/10.3390/su7044199
Joly A, Junge R, Bardocz T (2015) Aquaponics business in Europe: some legal obstacles and solutions. Ecocycles 1(2):3–5. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v1i2.30
König B, Janker J, Reinhardt T, Villarroel M, Junge R (2018) Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. J Clean Prod 180:232–243
Massot A (2017) The Common Agricultural Policy (CAP) and the treaty. Fact sheets on the European Union. European Parliament. Available online: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/en/displayFtu.html?ftuId¼FTU_3.2.1.html
Paetsch U (2013) Jahresfischereitag und Jahreshauptversammlung des Landesverbandes der Binnenfischer MV e.V. – Güstrow, 25. Februar 2013: Bericht des Präsidiums für das Jahr 2012, Fischerei & Fischmarkt in MV 2/2013, 6–9
Ragonnaud G (2017) Second pillar of the CAP: rural development policy. Fact sheets on the European Union. European parliament. 4 p. Available online: http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/en/displayFtu.html?ftuId¼FTU_3.2.6.html
Schulz K, Weith T, Bokelmann W, Petzke N (2013) Urbane Landwirtschaft und "Green Produc- tion" als Teil eines nachhaltigen Landmanagements. Discussion paper 6. Müncheberg
Schendel F (2016) Abwasserabgabe – wann kommt eine Reform? Natur und Recht:166–171
Sheil S (2013) Strategic guidelines for EU aquaculture. Library briefing. 6 p. Available online: http://www.europarl.europa.eu/eplibrary/Strategic-guidelines-for-aquaculture-in-the-EU.pdf. Accessed on 05 Oct 2017
Somerville C, Cohen M, Puntanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. FAO Fisheries and Aquaculture Technical paper 589. 288 p. Available online: http://www.fao.org/3/a-i4021e.pdf
Smith R, Pryor R (2015) Deliverable 5.1 – Mapping Exercise Report with regard to current Legislation & Regulation: Europe and Africa & China, 2015
Sodano V, Hingley M, Lindgreen A (2008) The usefulness of social capital in assessing the welfare effects of private and third-party certification standards: trust and networks. Br Food J 110 (4/5):493–513
Stamer A (2009) Betäubungs- & Schlachtmethoden für Speisefische, FiBL, Available online: http://orgprints.org/16511/1/stamer-2009-literaturstudie_fischschlachtung-FiBL_Bericht.pdf
Windstoßer C (2011) Rechtliche Voraussetzungen für die Errichtung von Kreislaufanlagen, Präsentation im Rahmen des Seminars "Fischproduktion in Kreislaufanlagen – Prinzipien, Wirtschaftlichkeit,

Zukunft" FFS Baden-Württemberg Available online: http://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_ffs/Windsto%C3%9Fer_Rechtliche%20Voraussetzung.pdf

Yanong RPE, Erlacher-Reid C (2012) Biosecurity in aquaculture, Part 1: An overview. SRAC Publication No. 4707

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 21

ACUAPONÍA EN EL ENTORNO CONSTRUIDO

Gundula Proksch, Alex Ianchenko, and Benz Kotzen

Capítulo 21

ACUAPONÍA EN EL ENTORNO CONSTRUIDO

Gundula Proksch, Alex Ianchenko and Benz Kotzen

Resumen
El potencial de la Acuaponía para transformar la producción urbana de alimentos se ha documentado en un rápido aumento de la investigación académica y el interés público en el campo. Para traducir esta publicidad en un impacto en el mundo real, la creación de granjas comerciales y su relación con el medio ambiente urbano deben ser examinadas más a fondo. Esta investigación tiene que cerrar la brecha entre la literatura existente sobre el rendimiento del sistema en crecimiento y los flujos metabólicos urbanos al considerar la forma construida de granjas acuapónicas. Para evaluar el potencial de integración urbana de la acuaponía, los estudios de caso existentes se clasifican por la tipología del recinto de su edificio, y las dos categorías principales son invernaderos y ambientes interiores. Esta clasificación permite algunas suposiciones sobre el desempeño de las granjas en su contexto, pero es necesaria una evaluación más profunda del ciclo de vida (ACV) para evaluar las diferentes configuraciones. El enfoque LCA se presenta como una forma de inventariar criterios de diseño y estrategias respectivas que pueden influir en el impacto ambiental de los sistemas acuapónicos en el contexto de los entornos urbanos construidos.

Palabras clave: Clasificación de acuaponía; Acuaponía urbana; Tipologías de cerramiento; Invernaderos; Cultivo interior; Agricultura de ambiente controlado; Evaluación del ciclo de vida.

21.1 INTRODUCCIÓN

La acuaponía ha sido reconocida como una de las "diez tecnologías que podrían cambiar nuestras vidas" por el mérito de su potencial para revolucionar la forma en que alimentamos a las poblaciones urbanas en creci-

G. Proksch (*)
A. Ianchenko
Department of Architecture, College of Built Environments, University of Washington, Seattle, WA, USA
E-mail: prokschg@uw.edu
B. Kotzen
School of Design, University of Greenwich, London, UK
E-mail: b.kotzen@greenwich.ac.uk

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_21

miento (Van Woensel et al. 2015). Este sistema de recirculación sin suelo ha estimulado el aumento de la investigación académica en los últimos años e inspiró interés en los miembros del público como lo documenta una alta proporción de resultados de búsqueda de Google a Google Scholar en 2016 (Junge et al. 2017). Durante mucho tiempo, la acuaponía se ha practicado principalmente como un pasatiempo en el patio trasero. Ahora se usa cada vez más comercialmente debido al fuerte interés del consumidor en los métodos de agricultura orgánica y sostenible. Una encuesta realizada por el equipo de CITYFOOD en la Universidad de Washington en julio 2018 muestra que el número de operaciones comerciales de acuaponía ha aumentado rápidamente en los últimos 6 años. Esta búsqueda enfocada de operaciones acuapónicas identificó 142 operaciones acuapónicas activas con fines de lucro en América del Norte. Según la información en línea, el 94% de las granjas han comenzado su operación a escala comercial desde 2012; solo nueve granjas comerciales de acuaponía han estado en funcionamiento durante más de 6 años (Fig. 21.1).

La mayoría de las operaciones de acuaponía encuestadas se encuentran en áreas rurales y a menudo están conectadas a granjas existentes para aprovechar los bajos precios de la tierra disponible, infraestructura y códigos de construcción propicios para estructuras agrícolas en cualquier caso, un número creciente de operaciones de acuaponía también se encuentran en las ciudades. Debido a su huella física relativamente

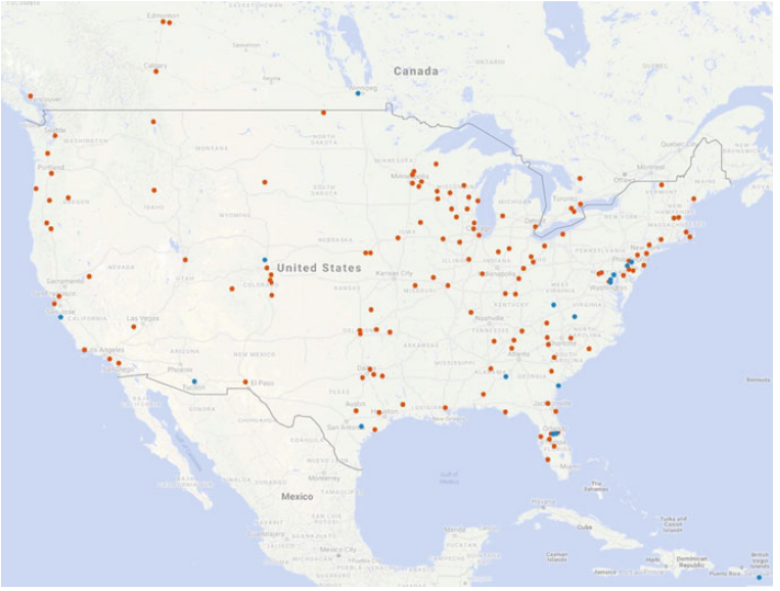


Fig. 21.1 Granjas profesionales de acuaponía existentes en América del Norte, 142 empresas comerciales (rojo) y 17 centros de investigación (azul), (CITYFOOD, julio de 2018).

Fig. 21.2 Acuaponía en toda Europa: 50 centros de investigación (azul) y 45 empresas comerciales. (rojo). (EU Aquaponics Hub 2017).

pequeña y a su alta productividad, las operaciones de acuaponía son muy adecuadas para practicar en entornos urbanos (Junge et al. 2017). Se identificaron encuestas realizadas bajo los auspicios del Centro de Acuaponía de la Unión Europea (UE) en 2017. 50 centros de investigación y 45 empresas comerciales que operan en la Unión Europea (Fig. 21.2). Estas empresas varían en tamaño desde pequeñas hasta medianas.

21.1.1 Acuaponía en entornos urbanos

El espacio es una mercancía valiosa en las ciudades. Las granjas urbanas deben ser ingeniosas para encontrar sitios disponibles, como lotes baldíos, tejados existentes y almacenes subutilizados que son asequibles para un negocio agrícola (de Graaf 2012; De La Salle y Holland 2010).

Las granjas de acuaponía urbana necesitan equilibrar los mayores costos de producción con las ventajas competitivas de comercialización y distribución que ofrecen las ubicaciones urbanas. El mayor beneficio para ubicar las operaciones de acuaponía en las ciudades es un mercado de consumo en crecimiento con interés en productos frescos, de alta calidad y cultivados localmente. Al cumplir con las regulaciones locales para

productos orgánicos, las granjas urbanas pueden alcanzar precios superiores por sus verduras de hoja verde, hierbas y tomates cultivados en acuaponía (Quagrainie et al. 2018). A diferencia de la hidroponía, la acuaponía también tiene la capacidad de producir peces, lo que mejora aún más la viabilidad económica en un entorno urbano que a menudo tiene diversas necesidades dietéticas (König et al. 2016). Las granjas de acuaponía urbana también pueden ahorrar algunos costos operativos al reducir la distancia de transporte al consumidor y la necesidad de almacenamiento de cultivos (dos Santos 2016). Las condiciones ambientales urbanas también pueden ser ventajosas para las granjas de acuaponía. Las temperaturas medias en las ciudades son más altas que en los alrededores rurales (Stewart y Oke 2010).

En las regiones más frías, en particular, las granjas pueden beneficiarse de un clima urbano más cálido, lo que puede ayudar a reducir la demanda de calefacción y los costos operativos (Proksch 2017) Las granjas de acuaponía que están integradas con los sistemas de construcción de un edificio anfitrión pueden utilizar aún más los recursos urbanos como el calor residual y el CO_2 en el aire de escape para beneficiar el crecimiento de las plantas como una alternativa a la fertilización convencional con CO_2. Las granjas urbanas también pueden ayudar a mitigar los aspectos negativos del efecto de isla de calor urbano durante los meses de verano. La vegetación adicional, incluso si se cultiva en invernaderos, ayuda a reducir la temperatura ambiente a través de una mayor evapotranspiración (Pearson et al. 2010). En acuaponía, el uso de la infraestructura de recirculación del agua reduce el consumo general de agua para la producción de pescado y lechuga y, por lo tanto, puede tener un efecto positivo en el ciclo urbano del agua. Los productos cultivados con acuaponía se esfuerzan por cerrar el ciclo de nutrientes, evitando así la producción de escorrentía agrícola. A través de la gestión inteligente de los recursos dentro de los principales sistemas ambientales, la acuaponía ayuda a reducir el consumo excesivo de agua y la eutrofización generalmente creada por la agricultura industrial.

21.1.2 Acuaponía como medio ambiente controlado agricultura (CEA)
Las técnicas agrícolas tradicionales para extender la temporada de cultivo natural van desde modificaciones ambientales mínimas, como las casas de aro temporales utilizadas en campos basados en el suelo, hasta el control ambiental total en instalaciones permanentes que permiten la producción durante todo el año independientemente del clima local (1973).

La última estrategia también se conoce como agricultura de ambiente controlado (CEA) e incluye tanto invernaderos como instalaciones de cultivo en interiores. Además de controlar el clima interior, CEA también

reduce significativamente el riesgo de pérdida de cultivos por calamidades naturales y la necesidad de herbicidas y pesticidas (Benke y Tomkins 2017). La mayoría de las operaciones acuapónicas se conciben como CEA ya que combina dos sistemas de cultivo complejos (acuicultura e hidroponía), que requieren condiciones de cultivo controladas para garantizar una productividad óptima. Además, CEA permite que la producción durante todo el año amortice la alta inversión en infraestructura acuapónica y logre precios de cosecha premium en el mercado fuera de la temporada de crecimiento natural. El rendimiento de los recintos de granja de acuaponía depende en gran medida del clima local y los cambios estacionales (Graamans et al. 2018).

Como la acuaponía es una disciplina relativamente joven, la mayor parte de la investigación existente se centra en el nivel del sistema, por ejemplo, estudios que evalúan la integración técnica de la acuicultura con la hidroponía en diferentes configuraciones (Fang et al. 2017; Lastiri et al. 2018; Monsees et al.2017). Si bien los componentes individuales del sistema de acuaponía y sus interacciones pueden optimizarse aún más para la productividad, su rendimiento dentro de un entorno de entorno controlado no se ha abordado de manera exhaustiva. Investigaciones recientes en CEA han comenzado a evaluar el rendimiento del sistema hidropónico en conjunto con el rendimiento del entorno construido, aunque hasta la fecha solo hay un estudio que modela el rendimiento del sistema hidropónico en un sobre controlado (Benis et al. 2017a; Körner et al. 2017; Molin y Martin 2018a; Sanjuan- Delmás et al. 2018).

21.1.3 Colaboraciones de investigación en acuaponía

La expansión actual en el interés en acuaponía condujo a la creación de varias colaboraciones interdisciplinarias de investigación relacionadas con acuaponía financiadas por la Unión Europea (UE). El proyecto COST FA1305, que creó el Centro de Acuaponía de la UE (2014–2018) reunió a productores de investigación acuaponía y productores comerciales para comprender mejor el estado del arte en acuaponía y generar esfuerzos coordinados de investigación y educación en toda la UE y en todo el mundo. Aquaponics innovador para aplicación profesional (INAPRO) (2014–2017), un consorcio de 17 socios internacionales, destinados a avanzar en los enfoques actuales de las zonas rurales y urbanas acuaponía a través del desarrollo de modelos y construcción de invernaderos prototípicos. El proyecto CITYFOOD (2018–2021) dentro de la Iniciativa de Crecimiento Urbano Sostenible (SUGI), cofinanciado por la UE, el Foro de Belmont y sus respectivas fundaciones científicas, investiga la integración de la acuaponía en el contexto urbano y su impacto potencial en los desafíos globales de el nexo comida-agua-energía.

21.2 CLASIFICACIÓN DE ACUAPONÍA EN AMBIENTE CONTROLADO

El término acuaponía se utiliza para describir una amplia gama de diferentes sistemas y operaciones, que varían mucho en tamaño, nivel de tecnología, tipo de recinto, propósito principal y contexto geográfico (Junge et al. 2017). La primera versión de los criterios de clasificación para las granjas de acuaponía incluyó los objetivos de las partes interesadas, el volumen del tanque y los parámetros que describen la acuicultura y los componentes del sistema hidropónico (Maucieri et al. 2018) Un gran grupo de investigadores realizó un trabajo adicional para definir mejor la acuaponía y presentar una nomenclatura basada en el consenso internacional (Palm et al. 2018). Esto condujo a una discusión exhaustiva sobre los tipos y escalas del sistema y, lo que es más importante, una definición de acuaponía que es: "la mayoría (> 50%) de los nutrientes que sustentan el crecimiento óptimo de la planta deben derivarse de los desechos provenientes de la alimentación de los organismos acuáticos". Sin embargo, ambas definiciones se centran en los sistemas de cultivo y no consideran otros aspectos esenciales de una granja comercial de acuaponía en funcionamiento. A medida que las operaciones de acuaponía se conviertan en parte de las economías locales, los criterios de clasificación identificados por la investigación interdisciplinaria en campos como la arquitectura, la economía y la sociología también serán esenciales.

Esta propuesta de clasificación se centra en el campo emergente de las operaciones comerciales de acuaponía a través de la lente del entorno construido. Las características clave que describen una operación acuapónica se dividen en cuatro categorías diferentes: sistema de cultivo, recinto, operación y contexto (Fig. 21.3). Estas categorías para los criterios de clasificación se impactan entre sí en todas las escalas, donde las configuraciones del sistema de cultivo pueden afectar el rendimiento contextual de la granja como negocio, o las demandas del mercado local pueden determinar el tipo de cultivo en el sistema acuapónico. Algunos criterios de clasificación de la granja son relevantes en todas las escalas, como el "tamaño", medido en el volumen del tanque, el área de cultivo, el número de empleados y los ingresos anuales (Tabla 21.1).

- Los criterios de clasificación del sistema de cultivo describen la configuración del sistema hidropónico y acuícola interconectado. Esto incluye especificaciones para los componentes físicos que permiten la recirculación de agua y nutrientes (como tanques de agua, filtros, bombas y tuberías), organismos vivos que transforman los nutrientes disponibles en diferentes etapas (incluidas especies de peces, plantas y

Table 21.1 Posibles criterios de clasificación para identificar tipos de granjas acuaponicas.

Sistema de crecimiento	Recinto	Operación	Contexto
Tipo de Sistema acuícola	Tipología del recinto/gabinete	Propósito	Localización geográfica
Especies de peces	Sistema estructural	Partes interesadas	Contexto físico
Temperatura del agua	Material de cubierta del conjunto	Modelo de negocio	Impacto medio ambiental
Sistemas de filtración	Sistemas de calefacción/refrigeración	Distribución de las labores	Contexto socioeconómico
Tipo de alimento	Fuente de iluminación	Tipo de financiación	
Tipo de Sistema Hidropónico	Sistema de ventilación	Esquema de Marketing	
Especies de cultivos			Impacto Social
Sistema de distribución de agua	Integración del edificio elegido	Modelo de distribución	

microorganismos) y valores que describen el rendimiento físico del sistema, como temperatura, Ph, contenido de oxígeno / carbono y conductividad eléctrica (Alsanius et al. 2017).

- Los criterios de clasificación del recinto definen las características de los edificios que albergan los sistemas de cultivo, en la siguiente escala. La mayoría de las granjas de acuaponia utilizan recintos CEA que varían según la tipología (como un invernadero o almacén), sistema estructural, sistemas de calefacción y refrigeración, iluminación, ventilación y sistemas de control de humedad (Benke y Tomkins 2017).
- Los criterios de clasificación de operaciones describen cómo cada granja de acuaponia opera como un negocio y una granja, que incluye la experiencia humana y el aporte de mano de obra necesarios para cultivar y vender productos.
- Los criterios en esta sección incluyen el tipo de financiamiento, la estructura y administración del negocio, los requisitos y la división laboral, el esquema de comercialización, el modelo de distribución de productos y el propósito general de la instalación de acuaponía.
- Los criterios de clasificación de contexto, a la escala más grande, describen la ubicación geográfica, el contexto físico, la integración urbana y el impacto social general de las granjas acuaponicas. Los criterios de contexto describen cómo una granja de acuaponia es parte de la cadena alimentaria urbana y del medio ambiente construido, capaz de influir en el crecimiento económico, la participación social y los impactos ambientales a gran escala en toda la ciudad (dos Santos 2016).

21.3 TIPOLOGÍAS DE GABINETES Y ESTUDIOS DE CASOS DE GRANJAS COMERCIALES.

Esta investigación adicional se centra en la definición de criterios de

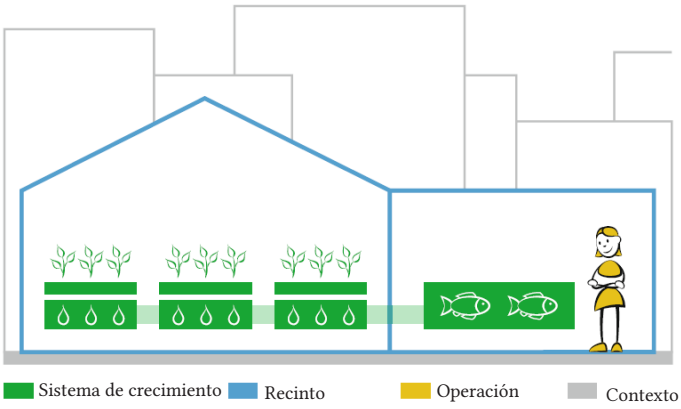


Fig. 21.3 Criterios de clasificación para identificar tipos de granjas acuapónicas.

clasificación acuapónica en el nivel del recinto para complementar las definiciones existentes a nivel del sistema. Los tipos de gabinetes discutidos aquí funcionan con diferentes sistemas de construcción, niveles de tecnología control, estrategias de control climático pasivo y fuentes de energía para lograr un clima interior apropiado. La mejor aplicación de cada tipología de cerramiento depende principalmente del tamaño de la operación, la ubicación geográfica, el clima local, las especies específicas de peces y cultivos, los parámetros requeridos de los sistemas que alberga y el presupuesto. Este estudio identifica cinco tipologías de recintos diferentes y define las características de los espacios interiores que albergan la infraestructura de la acuicultura.

21.3.1 Tipologías de invernaderos

Esta clasificación incluye cuatro categorías de invernaderos: invernaderos de tecnología media, invernaderos solares pasivos, invernaderos de alta tecnología e invernaderos en la azotea, que son aplicables a las operaciones de acuaponía a nivel comercial (Tabla 21.2). Los invernaderos existentes pueden no ajustarse exactamente a una tipología única, sino que caen dentro de un espectro de tecnología media a alta tecnología al incorporar selectivamente técnicas de control ambiental activas y pasivas.

Invernaderos de tecnología media: Los invernaderos con niveles intermedios de tecnología para controlar el clima interior incluyen Quonset independiente o conectado a la canaleta (tipo cabaña Nissen), aro de casa (túnel de polietileno) e invernaderos de luces iguales. Por lo general, están cubiertos con doble película de polietileno (PE) o paneles de plástico rígido, como paneles acrílicos (PMMA) y paneles de policarbonato (PC). La instalación de estos invernaderos es menos costosa, aunque el revesti-

miento de la película debe reemplazarse con frecuencia debido al rápido deterioro causado por la exposición constante a la radiación UV (Proksch 2017). Estos invernaderos protegen los cultivos de eventos climáticos extremos y, en cierta medida, de patógenos, pero ofrecen solo un nivel limitado de controles climáticos activos. En cambio, dependen de la radiación solar, sistemas de sombreado simples y ventilación natural. Con su capacidad limitada para modificar las condiciones de crecimiento dentro de un cierto rango, los invernaderos de tecnología media, rara vez se usan para albergar granjas acuapónicas en climas fríos. Esto se debe a que la alta inversión inicial en los componentes hidropónicos y acuícolas requiere un ambiente estable y una producción confiable durante todo el año para ser comercialmente viable.

Las operaciones de acuaponia en climas más cálidos han demostrado con éxito el uso de invernaderos de tecnología media que emplean enfriamiento evaporativo y sistemas de calefacción simples. Por ejemplo, Sustainable Harvesters en Hockley, Texas, EE. UU., Utiliza un simple invernadero Quonset (12,000 pies cuadrados / 1110 m2) para la producción de lechuga durante todo el año sin depender de calefacción o iluminación suplementaria extensiva.

Ouroboros Farms en Half Moon Bay, California, EE. UU., Usa un invernadero existente (20,000 pies cuadrados / 1860 m2) para producir lechuga, verduras de hoja verde y hierbas (Fig. 21.4). Debido al clima templado, la granja utiliza principalmente sombra estática y poco calentamiento y enfriamiento adicionales. Both farms, as many smaller medium-tech operations, place their fish tanks in the same greenhouse space as the hydroponic crop growing system. The farms grow fish species that tolerate a wide temperature range (tilapia) and shade aquaculture tanks to prevent overheating and algae growth. Invernaderos solares pasivos Este tipo de invernadero está diseñado para ser calentado únicamente por energía solar. Elementos de masa térmica sustanciales, como una pared sólida orientada al norte, almacenan energía solar en forma de calor que luego se re-irradia durante los períodos más fríos por la noche. Este enfoque amortigua los cambios de temperatura del aire y puede reducir o eliminar la necesidad de combustibles fósiles. Los invernaderos solares tienen un lado transparente orientado al sur y un lado opaco, masivo y altamente aislado orientado al norte. La integración de grandes volúmenes de agua en forma de tanques de peces es un activo para el rendimiento térmico de este tipo de invernadero. Además, los tanques se pueden ubicar en áreas del invernadero que son menos adecuadas para el cultivo de plantas o parcialmente sumergidas en el suelo para mayor estabilidad térmica.

Invernaderos de tecnología solar: el invernadero solar acuapónico (2000 pies cuadrados / 180 m2), desarrollado y probado por Franz Schreier, ha demostrado ser un entorno adecuado para albergar un pequeño sistema acuapónico en el sur de Alemania. El invernadero recolecta energía solar a través de su techo arqueado orientado al sur y la pared revestida con película de etileno tetrafluoretileno (ETFE). El calor se almacena en tanques de peces parcialmente sumergidos, en el piso y en la pared norte revestida de adobe para ser disipados por la noche. Los paneles fotovoltaicos (PV) hechos a medida del invernadero transforman la radiación solar en energía. Ubicado en el clima más frío de Vermont, EE. UU., El invernadero Eco-Ark en la granja Finn & Roots (6000 pies cuadrados / 560 m2) alberga un sistema acuapónico que funciona con un enfoque solar pasivo similar. El invernadero tiene un techo transparente empinado (aprox. 60) orientado al sur con acristalamiento solar especial (Fig. 21.5). Su lado norte opaco altamente aislado está sumergido en una ladera y alberga los tanques de peces. Además de estos controles pasivos, el Eco-Ark tiene una calefacción por suelo radiante que complementa la calefacción durante las estaciones más frías.

Invernaderos de alta tecnología: los invernaderos de alta tecnología y estilo venlo que cuentan con un alto nivel de tecnología para controlar el clima interior son el estándar para el CEA hidropónico a escala comercial. Los invernaderos de alta tecnología se caracterizan por controles computarizados e infraestructura automatizada, como cortinas térmicas automáticas, conjuntos de iluminación automáticos y sistemas de ventilación de aire forzado. Estas tecnologías permiten un alto nivel de control ambiental, aunque tienen el costo de un alto consumo de energía.

Algunas granjas acuaponicas comerciales a gran escala usan esta tipología de invernadero para la producción de sus plantas, como las granjas Superior Fresh, ubicadas en Hixton, Wisconsin, EE. UU. (123,000 pies cuadrados / 11,430 m^2), con los sistemas de acuicultura alojados en un recinto opaco separado. La iluminación y calefacción LED suplementarias automatizadas permiten a las granjas de Superior Fresh cultivar verduras de hoja verde durante todo el año a pesar de la falta de luz diurna en invierno, donde la temporada de crecimiento natural y sin heladas dura solo 4 meses.

Los sistemas automatizados para el control interno del clima permiten operar invernaderos de alta tecnología en cualquier parte del mundo: el invernadero Blue Smart Farms utiliza una variedad de sensores para optimizar la sombra durante los veranos calurosos de Australia.

Tabla 21.2 Comparación de estudios de caso por tipologías de cerramiento

CEA TIPO	CASOS DE ESTUDIO	SISTEMA DE CONSTRUCCION	CONTROLES	TEMPORADA DE CRECIMIENTOa Y LATITUD	ZONAb DE RESISTENCIA
Invernaderos de tecnología media	Granja Ouroboros , Half Moon Bay, CA, USA (20,000 sf/1860 m²)	GH existente, conectada a la canaleta con dos tramos pares, revestida con vidrio de un solo panel, tanques de peces en GH	Sombreado estático, cortinas de sombreado	319 días/10.6 meses	10a
					30 a 35 °F
				37.5° N	-1.1 a 1 .7 °C
Invernaderos solares pasivos	Cultivos Sustentables, Hockley, TX, USA (12,000 sf/1110 m²)	Marco Quonset, multitúnel (3) GH, revestido con película de PE y paneles de plástico rígido, pescado tanques en GH	Enfriamiento por evaporación, ventilación forzada.	272 dias/nueve meses	8b
					15 a 20 °F
				30.0° N	-9.4 a 6.7 °C
	Invernadero Solar Acuapónico Neuenburg am Rhein, Alemania (2000 sf/180 m²)	(Chino) invernadero solar, con pared de adobe como masa térmica adicional, revestida con película de ETFE, tanques de peces en GH	Módulos fotovoltaicos a medida para sombreado y producción de energía.	202 meses/6.6 meses	8ª
					10–15 °F
				47.8° N	-12.2 a 9.4 °C
	Invernadero Eco-arca en Finn & Raíces Bakersfield, VT, EE. UU. (6000sf/560 m²)	Invernadero solar, tierra protegida, ángulo empinado del techo orientado al sur (ca.60), aislamientos gruesos, acristalamientos especiales de captación solar, tanques de peces en el norte, lado subterráneo	Calor radiante a leña, cortina energética, ventilación con iluminación LED suplementaria de efecto apilado	108 días/3.6 meses	4ª
					-30 a -25 °F
				44.8 N	34.4 a 31.7 °C
Invernaderos de alta tecnología.	Superior Fresh Farms, Hixton, WI, EE. UU. (123,000 sf/11,430 m²)	Estilo Venlo, conectado a la canaleta, (20x41 bahías), revestidas con vidrio, tanques de peces en un edificio separado	Entorno CEA controlado por computadora, iluminación LED suplementaria,	122 días/4.1 meses	4b
					-25 a -20 °F
				44.4 N	-31.7 a 28.9 °C
	Blue Smart Farms, Cobbitty, Nueva Gales del Sur, Australia (53,800 sf/5000 m²)	Estilo Venlo, conectado a la canaleta, (14x18 bahías), revestido con vidrio, construcción de dos pisos.	Control biológico de plagas del ambiente CEA controlado por computadora	300 días/10 meses	9b
					25 a 30 °F
				34.0 S	-3.9 a -1.1°C

(continua)

Continuación Tabla 21.2 Comparación de estudios de caso por tipologías de cerramiento

CEA TIPO	CASOS DE ESTUDIO	SISTEMA DE CONSTRUCCION	CONTROLES	TEMPORADA DE CRECIMIENTO[a] Y LATITUD	ZONA[b] DE RESISTENCIA
Invernaderos en la azotea	Ecco-jäger Aquaponik Dachfarm, Bad Ragaz, Suiza (12,900 pies cuadrados/1200 m²)	Estilo Venlo, conectado a la canaleta, (7x13 bahías), revestidas con vidrio, tanques de peces en el nivel inferior	Ambiente CEA, iluminación LED suplementaria, uso de calor de escape de la instalación de enfriamiento	199 días/6.6 meses 47.0 N	7b 5 a 10 °F -15.0 to -12.2 °C
	Ferme abattoir de BIGH, Bruselas, Bélgica (21,600 pies cuadrados / 2000 m²)	Estilo Venlo, conectado a la canaleta, (15x10 bahías), revestido con vidrio, tanques de peces en el nivel inferior	Ambiente CEA, iluminación LED suplementaria	224 dias/7.3 meses 50.8 N	8b 15 a 20°F -9.4 a - 6.7°C
Espacios de cultivo de interior	Organicos urbanos, Schmidt's Brewery, St. Paul, MN, EE. UU. (87,000 pies cuadrados / 8080 m²)	Almacén de estructura de acero, tanques de peces de cultivo altamente aislados, apilados, en un espacio separado	Iluminación fluorescente UV, ambiente CEA controlado por computadora	140 días/4.7 meses 45.0 N	4b 25 a 20°F 31.7 a 28.9°C
	Nutraponicos, Sherwood Park, AB, Canadá (10,800 pies cuadrados / 1000 m²)	Almacén de estructura de acero, tanques de peces de cultivo altamente aislados, apilados, en un espacio separado	Iluminación LED, ambiente CEA controlado por computadora	121 dias/4 meses 53.5 N	4[a] 30 a 25°F -34.4 a -31.7°C

[a]Temporada de cultivo libre de heladas, Asociación Nacional de Jardinería, Herramientas y Aplicaciones, https://garden.org/ aplicaciones / calendario /

[b]Basado en el Mapa de zonas de resistencia del USDA, que identifica la temperatura mínima anual promedio de invierno (1976–2005), dividida en 10 zonas F. Mapas de plantas, https://www.plantmaps.com/index.php.

Fig. 21.4 Granja Ouroboros (Half Moon Bay, California, USA)

Fig. 21.5 Invernadero Eco-Ark en Finn & Roots Farm (Bakersfield, Vermont, EE. UU.)

Thanet Earth, el complejo de invernaderos más grande del Reino Unido, se encuentra en el sureste de Inglaterra. Sus cinco invernaderos cubren más de 17 acres (7 hectáreas) cada uno, cultivando tomates, pimientos y pepinos usando hidroponía (Fig. 21.6). Esta empresa funciona con un sistema combinado de calor y electricidad (CHP) que proporciona energía, calor y CO_2 para los invernaderos.

El sistema CHP funciona de manera muy eficiente y canaliza el exceso de energía al distrito local al alimentarlo a la red de suministro de energía local. Además, las tecnologías controladas por computadora, como las cortinas de energía, la iluminación complementaria de descarga de alta intensidad y la ventilación, regulan las condiciones de crecimiento en interiores. Invernaderos en la azotea Este tipo más reciente incluye los invernaderos construidos en la parte superior de los edificios anfitriones,

Fig. 21.6 Thanet Earth, invernaderos de última generación con provisión combinada de calor y energía (Isla de Thanet en Kent, Inglaterra, Reino Unido)

ya sea como retro adaptación de estructuras existentes o como parte de una nueva construcción. Debido a los altos costos de la tierra, el ahorro de espacio es cada vez más importante para las granjas de acuaponia en contextos urbanos. Conectar un invernadero a un edificio existente es una estrategia para los agricultores urbanos que buscan revitalizar el espacio infrautilizado y encontrar una ubicación central en la ciudad. Los invernaderos en la azotea ya son utilizados por los productores hidropónicos a escala comercial, pero son un tipo de recinto relativamente raro para las granjas de acuaponia debido al eso adicional de agua que puede tensar las estructuras existentes más allá de su capacidad de carga. Las pocas granjas de acuaponia en la azotea que existen actualmente priorizan los sistemas de distribución de agua liviana (técnica de película de nutrientes o cultivo basado en medios en lugar de cultivo en aguas profundas) y ubican sus tanques de peces en el nivel debajo del espacio de cultivo debido a una demanda relativamente reducida de luz natural.

Recientemente se han inaugurado en Europa dos granjas en la azotea con sistemas de acuaponia de alta tecnología. Ambos consultaron con consultores de sistemas agrícolas de City Farming (ECF) en Berlín. Ecco-jäger Aquaponik Dachfarm en Bad Ragaz, Suiza, se encuentra en la parte superior de un centro de distribución de una empresa de productos familiares. El invernadero en la azotea estilo Venlo (12,900 pies cuadrados / 1200 m^2) está ubicado en un edificio de depósito de dos pisos; los tanques de peces están instalados en el piso debajo del invernadero. Al cultivar hojas verdes y hierbas en su techo, Ecco-jäger reduce la necesidad de transporte y puede ofrecer productos inmediatamente después de la cosecha. Además, la granja aprovecha el calor residual generado por su almacena-

Fig. 21.7 BIGH Ferme Abattoir con el invernadero de alta tecnología al fondo (Bruselas, Bélgica)

miento en frío para calentar el invernadero. El matadero Ferme de BIGH (21,600 pies cuadrados / 2000 m2) es una versión más grande de un invernadero similar en la azotea estilo Venlo (Fig. 21.7), que ocupa el techo del mercado de Foodmet en Bruselas, Bélgica. Estos primeros ejemplos apuntan a un mayor potencial para optimizar tanto el rendimiento de acuaponia como el de envolvente mediante la conexión de los flujos de agua, energía y aire entre la granja y el edificio anfitrión, conocido como agricultura integrada en el edificio (BIA). Actualmente, se está realizando una investigación sobre el invernadero hidropónico integrado en la azotea del buque insignia ubicado en el edificio compartido por el Instituto de Ciencia y Tecnología Ambiental (ICTA) y el Instituto Catalán de Paleontología (ICP) en la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) para analizar los beneficios de la integración total del edificio, aunque no existe tal ejemplo en el campo de la acuaponia para determinar los beneficios de la integración total del edificio, aunque no existe tal ejemplo en el campo de la acuaponía.

21.3.2 Tipo de cultivo interior

Los espacios de cultivo interiores dependen exclusivamente de la luz artificial para la producción de plantas. A menudo, estos espacios de cultivo están altamente aislados y revestidos de un material opaco, originalmente destinado a almacenamiento o salas de fabricación industrial. Los espacios de cultivo interiores suelen tener un mejor aislamiento que los invernaderos debido al material de la envoltura, aunque no pueden depender de la luz natural o la calefacción natural. Se supone que esta

tipología es más adecuada para climas extremos, donde los cambios de temperatura son más preocupantes que la iluminación (Graamans et al. 2018), aunque se necesita una investigación más concluyente. Urban Organics opera dos granjas acuaponicas de cultivo comercial a escala comercial dentro de dos cervecerías restauradas en el núcleo industrial de St. Paul, Minnesota, EE. UU. Las dos granjas cultivan hojas verdes y hierbas en camas de cultivo apiladas iluminadas por luces de cultivo fluorescentes (Fig. 21.8). Su segundo sitio permite a Urban Organics aprovechar la infraestructura de la cervecería alrededor de un acuífero existente; el agua del acuífero necesita un tratamiento mínimo y se suministra a 10 ° C a la trucha ártica y la trucha arcoíris

El uso de estructuras existentes redujo los costos de construcción de lugares urbanos orgánicos y ofreció la oportunidad de revitalizar un área en dificultades de la ciudad. En un clima aún más frío, nutrapónicos cultiva hojas verdes en un almacén en una parcela rural a 40 km de Edmonton, Alberta, Canadá. Dado que los productos locales dependen en gran medida de los cambios de temperatura estacionales, nutrapónicos gana una ventaja competitiva en el mercado mediante el uso de iluminación LED para acelerar el crecimiento de los cultivos durante todo el año (Fig. 21.9).

21.3.3 Recintos para acuicultura

Los recintos para el componente de acuicultura de las operaciones de acuaponia técnicamente no son tan exigentes como el diseño del recinto para los componentes hidropónicos, ya que los peces no requieren luz

Fig. 21.8 Producción orgánica urbana (St. Paul, Minnesota, EE. UU.)

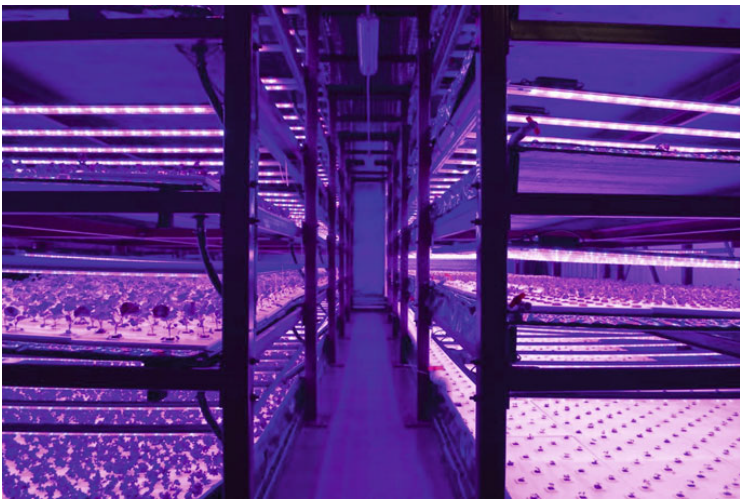


Fig. 21.9 Nutrapónicos (Sherwood Park, Alberta, Canadá)

solar para prosperar. Sin embargo, el control sobre las condiciones de cultivo en interiores permite a los agricultores optimizar el crecimiento, reducir el estrés y elaborar cronogramas precisos para la producción de peces, lo que les da a sus existencias una ventaja competitiva en el mercado (Bregnballe 2015). Los recintos espaciales de acuicultura se requieren principalmente para mantener la temperatura del agua estable. Las peceras deben ser capaces de soportar rangos de temperatura de agua cómodos para especies de peces específicos, peces de agua tibia de 75–86 F (24–30 C) y peces de agua fría de 54–74 F (12–23 C) (Alsanius et al. 2017) El agua y la temperatura ambiente pueden controlarse de manera más eficiente si los tanques de peces se alojan en un pozo.

Espacio aislado con pocas ventanas para minimizar las ganancias solares durante los meses de verano y las pérdidas de temperatura cuando baja la temperatura exterior (Pattillo 2017) como se demostró en la configuración del recinto INAPRO. El gran volumen de agua requerido para el cultivo de peces debe considerarse desde una perspectiva arquitectónica, ya que conlleva consecuencias para los sistemas estructurales y de acondicionamiento dentro de un edificio.

21.4 EVALUACIÓN DE TIPOLOGÍAS DE GABINETES Y POSIBLES APLICACIONES

El desempeño real de las granjas de acuaponia depende de muchos factores específicos del caso. Se pueden sacar algunas conclusiones preliminares sobre las ventajas, los desafíos y las posibles aplicaciones de las tipologías

de gabinetes a partir de la comparación de un conjunto relativamente pequeño de estudios de casos. Será necesario un estudio empírico de un número más significativo de estudios de casos existentes para establecer una correlación entre el tipo de recinto, la ubicación geográfica y el éxito comercial.

Los invernaderos de tecnología media ofrecen una opción comercialmente viable para operaciones de acuaponia solo en climas templados con inviernos suaves y veranos moderados, debido a su capacidad limitada de control ambiental. En lugares que no requieren mucho calentamiento y enfriamiento, las granjas que usan esta tipología de invernadero pueden operar de manera eficiente en cuanto a recursos con una inversión inicial más baja para su recinto. Estas granjas generalmente operan con un presupuesto más bajo e incluyen los tanques de peces en el mismo invernadero, que limita su selección de especies de peces a aquellos con una gran tolerancia a la temperatura y atrae su enfoque comercial a la producción de lechuga, verduras de hoja verde y hierbas.

Los invernaderos solares pasivos dependen de sistemas pasivos, específicamente el uso de energía térmica, para controlar el clima interior. El uso de esta tipología para sistemas acuapónicos es ventajoso ya que el gran volumen de agua en los tanques de peces proporciona una masa térmica adicional. Debido a su eficiencia energética, a menudo se usan en las latitudes del norte, donde los invernaderos convencionales requerirían un alto nivel de calefacción suplementaria. Sin embargo, la operación de cualquier invernadero en esas regiones depende del uso de iluminación suplementaria debido a los bajos niveles de luz y las cortas horas de luz durante la temporada de invierno. Aunque los invernaderos solares pasivos en Europa y América del Norte se usan actualmente en una pequeña escala experimental, la aplicación exitosa más general de estos invernaderos de pendiente única y eficientes en energía en 1.83 millones de acres (0.74 millones de hectáreas) de tierras agrícolas en China muestra que esta tipología puede implementarse con éxito a gran escala (Gao et al. 2010).

Los invernaderos de alta tecnología, especialmente los grandes sistemas conectados al canal de estilo Venlo, son el estándar de la industria para la producción hidropónica comercial. Las granjas comerciales de acuaponia más grandes y bien financiadas utilizan esta tipología para sus sistemas de cultivo hidropónico junto con un recinto separado para su infraestructura de acuicultura. Esta configuración garantiza el más alto nivel de control ambiental, así como la productividad de cultivos y peces. Técnicamente, este tipo de invernadero se puede operar en cualquier lugar, siempre que

los ingresos producidos paguen los altos costos de energía y operación en climas extremos. Sin embargo, este tipo de operación puede no ser ambientalmente sensible en algunas latitudes del norte debido a la gran necesidad de calefacción e iluminación suplementaria. La huella medioambiental exacta de un invernadero de alta tecnología solo se puede evaluar por proyecto y depende principalmente de la calidad de las fuentes de energía utilizadas para el calor y la luz suplementarios.

La mayoría de los invernaderos en la azotea son invernaderos de alta tecnología estilo Venlo construidos en tejados Si bien se aplican beneficios y desafíos similares, la construcción de invernaderos en la azotea es aún más costosa que la de los invernaderos normales de alta tecnología, principalmente debido a los códigos de construcción y los requisitos arquitectónicos. El sistema estructural de los invernaderos de los tejados a menudo está sobredimensionado para cumplir con los códigos de construcción para edificios de oficinas comerciales, que son más estrictos que los requisitos del código de construcción para estructuras agrícolas. Además, las operaciones de acuaponia en los tejados necesitan una infraestructura adicional para acceder al techo y cumplir con las regulaciones de incendio y salida, lo que ha generado un invernadero equipado con rociadores en un ejemplo reciente (Proksch 2017) La aplicación más prometedora de los invernaderos en la azotea se encuentra en la parte superior de los edificios anfitriones en los centros urbanos. Los techos urbanos a menudo ofrecen un amplio acceso a la luz solar, que los invernaderos requieren para funcionar eficazmente, un recurso que generalmente carece, o al menos no es consistente debido al sombreado, a nivel del suelo en áreas urbanas densas (Ackerman 2012). Si se diseñan a propósito, los edificios anfitriones pueden ofrecer otros recursos, como el calor de escape y el CO_2, que pueden hacer más factible la operación de una granja acuapónica en la azotea. Este tipo de integración con el edificio anfitrión puede generar sinergias energéticas y medioambientales que mejoran el rendimiento tanto del invernadero como del edificio anfitrión.

Los espacios de cultivo interiores dependen completamente de la iluminación artificial y los sistemas de control activo para calefacción, refrigeración y ventilación, lo que resulta en un alto nivel de consumo de energía, huella ambiental y costo de operación.

Esta tipología es más aplicable en áreas con inviernos fríos y temporadas de crecimiento cortas, donde la exposición natural a la luz solar y la ganancia de calor es baja y se necesita una suplementación extensa para operar un invernadero de acuaponia comercial. El uso de un recinto opaco permite altos niveles de aislamiento, lo que reduce la pérdida de calor

durante los meses de invierno y proporciona autonomía frente a los cambios de temperatura externos. Además de su dependencia de la iluminación eléctrica, el cultivo en interiores excede la productividad de los invernaderos como se mide en otros recursos, como el agua, el CO2 y la superficie terrestre (Graamans et al. 2018) Además, la producción por unidad de área de tierra puede ser mucho mayor a través del uso de sistemas de cultivo apilados. Con respecto a la integración urbana de acuaponia en las ciudades, los espacios de cultivo interiores permiten la reutilización adaptativa de edificios industriales y almacenes, lo que puede reducir el costo inicial para la construcción del recinto y respaldar la integración de granjas acuaponicas en vecindarios desatendidos. La configuración del proyecto Innovador Acuaponia para Aplicaciones Profesionales (INAPRO, 2018) incluyó la comparación del mismo sistema de acuaponía de última generación y tecnología de invernadero, en varios sitios en Alemania, Bélgica y España. El sistema de acuaponia ubicado en China se encontraba en un invernadero solar pasivo. Las instalaciones de acuaponia de INAPRO en Europa utilizaron un tipo de invernadero revestido de vidrio para la producción de plantas y un componente de cobertizo de tipo industrial para tanques de peces y unidades de filtración (Fig. 21.10). El proyecto INAPRO demuestra que el invernadero Las tecnologías deben adaptarse y elegirse para adaptarse a las condiciones climáticas locales. El equipo español de INAPRO descubrió que el recinto seleccionado era adecuado para las regiones más frías del norte de Europa, pero no para las regiones mediterráneas más cálidas del sur de Europa. Esta observación resalta la importancia de una mayor investigación sobre el

Fig. 21.10 Recinto de acuaponía INAPRO con dos secciones, opaco para peces e invernadero para plantas (Murcia, España).

desempeño de las tipologías de invernaderos para avanzar en el campo de las operaciones comerciales de acuaponia.

Si bien la comparación de las diferentes tipologías revela ciertos patrones de desempeño entre tipología, ubicación e inversión (Tabla 21.3), para una comprensión integral del desempeño de la granja y el impacto ambiental, se necesita un sistema más robusto para el análisis y diseño de los recintos de la granja. .

21.5 EVALUACIÓN DE IMPACTO COMO MARCO DE DISEÑO

El crecimiento de la acuaponia y las afirmaciones generalizadas de que la acuaponia es más sostenible que otras formas de producción de alimentos ha estimulado la discusión y la investigación sobre la sostenibilidad de estos sistemas. La evaluación del ciclo de vida (ACV) es un método de cuantificación clave que puede usarse para analizar la sostenibilidad tanto en la agricultura como en los entornos construidos mediante la evaluación de los impactos ambientales de los productos a lo largo de su vida útil. Para un edificio, un ACV se puede dividir en dos tipos de impacto: impacto incorporado que incluye extracción de material, fabricación, construcción, demolición y eliminación / reutilización de dichos materiales, e impacto operativo que se refiere al mantenimiento de los sistemas del edificio (Simonen 2014) . Del mismo modo, la realización de una evaluación de un producto agrícola también se puede dividir en el impacto estructural de la envolvente del edificio y la infraestructura del sistema, Impacto en la producción asociado con el cultivo continuo y el impacto postcosecha del empaque, almacenamiento y distribución (Payen et al. 2015).

La realización de un ACV de una granja hidropónica requiere la comprensión simultánea de los impactos tanto en la construcción como en la agricultura, ya que hay una superposición en la fase operativa del sobre con la fase de producción del cultivo. La forma en que un edificio opera sus sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación influye directamente en el cultivo del cultivo; a la inversa, diferentes tipos de cultivos requieren diferentes condiciones ambientales. Existen numerosos estudios que comparan los resultados de LCA para diferentes tipos de edificios ubicados en diferentes contextos (Zabalza Bribián et al. 2009). Del mismo modo, el sector agrícola ha utilizado el ACV para comparar las eficiencias para diferentes cultivos y sistemas de cultivo (He et al. 2016; Payen et al. 2015). Evaluar el desempeño de la agricultura y la acuaponía en un ambiente controlado en particular requiere una hábil integración de las dos metodologías en una sola evaluación (Sanyé-Mengual 2015). El marco de ACV de la granja de acuaponia propuesto (Fig. 21.11) es intencionalmente amplio

para capturar una amplia gama de tipologías de granja encontradas en el campo. Para aplicar los resultados de LCA a las granjas existentes, se deben incluir factores tales como los datos climáticos y económicos para validar la evaluación ambiental (Goldstein et al. 2016; Rothwell et al. 2016) La siguiente sección discute una colección de diseño de recintos de acuaponia. estrategias basadas en el inventario de LCA de granjas acuaponicas que sintetiza las existentes literaturas con estudios de casos y sugiere direcciones para trabajos futuros. La integración única de los impactos acuapónicos y relacionados con la construcción es de particular interés.

21.5.1 Impactos incorporados: energía incorporada y carbón incorporado

Materiales de estructura y construcción La energía incorporada es el cálculo de la suma de energía utilizada para extraer, refinar, procesar, transportar, producir y ensamblar un material o producto. El carbono incorporado es la cantidad de CO2 emitido para producir el mismo material o producto. En comparación con las operaciones agrícolas de campo abierto convencionales, el impacto incorporado de un sistema de cultivo en ambiente controlado es mayor debido a la mayor extracción y fabricación de material en la etapa de construcción (Ceron-Palma et al. 2012). Por ejemplo, en el invernadero de techo ICTA-ICP, la estructura de la envoltura genera un 75% más de potencial de calentamiento global (GWP) que una estructura de invernadero de túnel múltiple basada en el suelo debido a la cantidad de policarbonato utilizado en la construcción (Sanyé- Mengual et al.2015). Del mismo modo, una simulación de invernadero integrada en el edificio situada en Boston resultó en un mayor impacto ambiental en la etapa de construcción, debido a la extracción de minerales de hierro para la fabricación de acero estructural (Goldstein 2017). Los impactos incorporados asociados con los envolventes de entornos controlados pueden mitigarse mediante el uso inteligente de materiales (dado que los ajustes del código de construcción se realizan para evitar el sobredimensionamiento de los miembros estructurales), pero sin embargo superarían los de la agricultura tradicional. Cultivar alimentos en un sobre construido siempre requerirá más recursos al principio en comparación con simplemente plantar vegetales en un campo abierto, aunque también aumentará drásticamente la cantidad de alimentos que se pueden producir por área ocupada en el mismo período de tiempo.

Para evitar impactos ambientales relacionados con la estructura, algunas operaciones de acuaponia hacen uso de los edificios existentes en lugar de construir una nueva envolvente. Urban Organics en St. Paul, Minnesota, EE. UU., Renovó dos edificios de cervecería como sus espacios interiores de

Tabla 21.3 Comparación de tipologías de agricultura de ambiente controlado

CEA tipo	Beneficios	Desafíos	Costo e ingresos[a]
Invernaderos de tecnología media	Se basa casi por completo en energía solar, bajo requerimiento de energía adicional	Opciones de control ambiental limitadas, susceptibles a fluctuaciones ambientales	Menor costo inicial / construcción (aprox. 30–100 $/m^2)
	Menos dependencia de materiales no renovables y fuentes de energía.	Solo aplicable a especies de peces con una gran tolerancia a la temperatura (si los tanques están en el invernadero)	
Invernaderos solares pasivos	Se basa en sistemas pasivos, utiliza masa térmica (incluidos los tanques de peces) para amortiguar los cambios de temperatura.	El control con sistemas pasivos necesita más experiencia y diseño deliberado.	Menor costo inicial / construcción (aprox. 30–100 $ m^2)
	Bajo consumo de energía, potencialmente sin la necesidad de ningún combustible fósil.	Requiere iluminación suplementaria, si se encuentra en las latitudes del norte debido a los bajos niveles de luz	
Invernaderos de alta tecnología.	Los niveles más altos de controles	Se basa en sistemas activos de calor, refrigeración y ventilación e iluminación suplementaria	Alto costo inicial / construcción, (aprox. 100–200$/m^2 y más)
	Alta productividad con el potencial de escalar	Alto consumo de energía y costo de operación.	
Invernaderos en la azotea	Los niveles más altos de controles	Se basa en sistemas activos de calor, refrigeración y ventilación e iluminación suplementaria,	Muy alto costo inicial/construcción (aprox. 300–500$/m^2)
	Alta productividad	Alto consumo de energía y costos de operación	
	Potencial de sinergias energéticas y ambientales, si se integra con el edificio anfitrión	Requiere el cumplimiento del código a nivel de edificios de oficinas comerciales	
		El transporte de suministros a la azotea es un desafío de infraestructura.	
Espacios de cultivo de interior	Posible reutilización adaptativa de naves industriales	Depende completamente de la iluminación eléctrica y de los sistemas de control activo para calefacción, refrigeración y ventilación.	El costo inicial / de construcción puede ser menor si se puede usar el edificio existente
	Alta productividad por unidad de superficie mediante sistemas de cultivo apilados	Alto consumo de energía y costo de operación.	El costo depende también del sistema en crecimiento, apilando niveles múltiples
	Alto nivel de aislamiento posible		
	Reducción de la pérdida de calor durante los meses de invierno.		

[a]Basado sobre Proksch (2017)

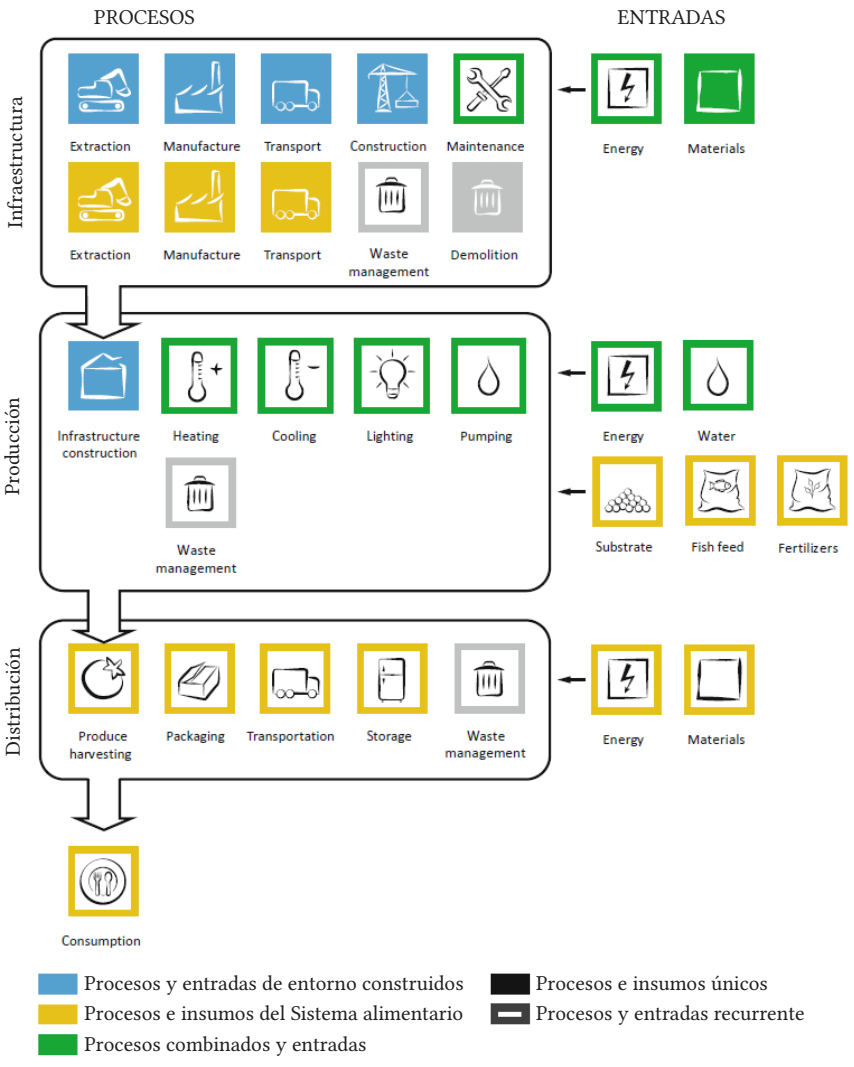


Fig. 21.11 Ejemplo de un proceso integrado de ACV que incluye el rendimiento del sistema de construcción y acuaponía (Basado en Sanyé-Mengual et al. 2015).

cultivo. En otro ejemplo de reutilización adaptativa, The Plant en Chicago, Illinois, EE. UU., Opera su incubadora de alimentos y el colectivo de granjas urbanas en un edificio de fábrica de 1925 utilizado previamente por Peer Foods como una instalación de envasado de carne (Fig. 21.12). Los equipos de aislamiento y refrigeración existentes se reutilizaron para controlar las fluctuaciones de temperatura en las instalaciones experimentales de acuaponia.

Fig. 21.12 La Planta (Chicago, Illinois, USA).

Equipo y sustrato de acuaponía Cuando se integra en los edificios, la elección del material para los tanques de acuaponía se convierte en una consideración de diseño importante, ya que puede limitar el montaje y el transporte al interior del edificio. Por ejemplo, las piezas de polietileno se pueden ensamblar en el sitio mediante soldadura de plástico, pero esto no es posible con piezas de fibra de vidrio (Alsanius et al. 2017). Además, la fabricación de equipos de sistemas de acuaponía puede ser un contribuyente significativo al impacto ambiental general, Por ejemplo, el poliéster reforzado con fibra de vidrio utilizado para el tanque de agua de 100 m3 en el invernadero de la azotea ICTA-ICP es responsable del 10-25% del impacto ambiental en la etapa de fabricación (Fig. 21.13). La elección del sustrato para las plantas en un sistema de acuaponía tiene una relación de peso para la estructura del edificio anfitrión, pero también contribuye al impacto ambiental. En un estudio reciente realizado sobre acuaponía integrada con paredes vivas, la lana mineral y la fibra de coco tuvieron un rendimiento comparable, a pesar de que una es compostable y la otra de un solo uso (Khandaker y Kotzen 2018).

Mantenimiento de la estructura y el equipo La selección inicial de material para el equipo de acuaponía y los componentes de la envoltura determina el mantenimiento a largo plazo de las granjas de acuaponía.

La fabricación de materiales más duraderos como el vidrio o los plásticos rígidos requiere una mayor inversión inicial de recursos ambientales que las películas de plástico; sin embargo, las películas requieren reemplazo con mayor frecuencia; por ejemplo, se espera que el vidrio permanezca funcional durante más de 30 años, mientras que las películas de polietileno recubiertas más convencionales solo pueden durar de 3 a 5 años antes de

Fig. 21.13 Sección del edificio con invernaderos en la azotea, edificio ICTA-ICP (Bellaterra, España).

volverse demasiado opacas (Proksch 2017). Dependiendo de la vida útil prevista de una envoltura del sistema de acuaponía, puede ser más ventajoso elegir un material con una vida útil más corta y un menor impacto de fabricación. La película de ETFE utilizada en el invernadero solar acuapónico es un compromiso prometedor entre la longevidad y la sostenibilidad, aunque se necesita más investigación. El equipo de acuaponía estándar consta de tanques de agua y tuberías. Las tuberías para sistemas acuapónicos a menudo se fabrican a partir de PVC, lo que produce un impacto ambiental significativo en su proceso de fabricación, pero no requiere reemplazo por hasta 75 años. Algunos proveedores de acuaponía ofrecen bambú como alternativa orgánica.

21.5.2 Impactos Operacionales

Energía: En 2017, el 39% del consumo total de energía en los Estados Unidos correspondió al sector de la construcción (EIA). El sector agrícola representó aproximadamente el 1.74% del consumo total de energía primaria de EE. UU. En 2014, confiando fuertemente en gastos indirectos en forma de fertilizantes y pesticidas (Hitaj y Suttles 2016). La eficiencia energética es

un campo de investigación bien establecido tanto en el entorno construido como en la agricultura, que a menudo define los impactos operativos de un producto, edificio o granja en el ACV general (Mohareb et al.2017). La integración del uso de la energía agrícola y de los edificios puede optimizar el rendimiento de ambos (Sanjuan- Delmás et al.2018).

Calefacción: Los requisitos de energía para calentar los espacios de cultivo son de particular interés en los climas del norte, donde extender una temporada de cultivo naturalmente corta les da a las granjas hidropónicas integradas en el edificio una ventaja competitiva en el mercado (Benis y Ferrão 2018). Sin embargo, en climas más fríos, el consumo de energía por los sistemas de calefacción activos es un contribuyente significativo al impacto ambiental general. La evaluación de los espacios de cultivo condicionados en Boston, Massachusetts, los costos de calefacción neutralizaron los beneficios de eliminar millas de alimentos en la cadena alimentaria urbana (Benis et al. 2017b; Goldstein 2017). Esto no es cierto en los climas mediterráneos, donde las condiciones climáticas son propicias para la agricultura y donde las estructuras de invernadero convencionales y casi todo el año pueden depender del calentamiento solar pasivo (Nadal et al.2017; Rothwell et al.2016). Tanto en climas fríos como cálidos, la integración de los sistemas de cultivo en ambientes controlados en los techos existentes puede proporcionar aislamiento al edificio anfitrión: una granja en Montreal, Quebec informa que captura el 50% de las necesidades de calefacción del invernadero de la estructura del anfitrión existente, reduciendo así la carga de calefacción (Goldstein 2017). Los sistemas de iluminación también pueden ser parcialmente responsables de satisfacer la demanda de calefacción en aplicaciones de cultivo vertical en interiores, como fábricas de plantas o contenedores de envío (Benis et al. 2017b).

La captura de calor residual es otra estrategia de diseño prometedora que puede optimizar el rendimiento tanto de la estructura del host como del sistema de crecimiento. Los estudios posteriores a la ocupación del invernadero experimental en la azotea en el ICTA-ICP en Bellaterra, España, indican que la integración del edificio con el invernadero produjo un ahorro de carbono equivalente de 113.8 kg / m2 / año en comparación con un invernadero independiente convencional calentado con aceite (Nadal et al. 2017). Sin la intervención de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) activos, la masa térmica del laboratorio / edificio de oficinas aumentó la temperatura del invernadero en 4.1 C durante los meses más fríos, permitiendo el cultivo de la cosecha de tomate durante todo el año.

Enfriamiento: En climas mediterráneos y tropicales, el enfriamiento

artificial es a menudo un requisito para cultivar productos durante todo el año. En una simulación de invernadero en la azotea, las cargas de refrigeración representaban hasta el 55% de la demanda total de energía de las granjas en Singapur y en el clima más templado de París, el 30% (Benis et al. 2017b).

Las demandas de energía de enfriamiento son especialmente altas en climas áridos, que pueden beneficiarse al máximo al reducir los costos de transporte convencionales para productos perecederos (Graamans et al.2018; Ishii et al.2016). El enfriamiento por evaporación, el enfriamiento por niebla y el sombreado son algunas estrategias para reducir las temperaturas en las granjas acuapónicas y mejorar el rendimiento de la granja en términos de rendimiento.

Los sistemas de acuaponía integrados en el edificio tienen la ventaja de almacenar masa térmica en tanques de peces para aliviar las cargas de refrigeración y calefacción. En los casos en que este modo de enfriamiento pasivo no satisface la demanda de enfriamiento, el enfriamiento por evaporación se usa más comúnmente. El invernadero Los cosechadores sostenibles producen lechuga para el área de Houston, Texas, EE. UU. Durante todo el año mediante el uso de un sistema de enfriamiento por ventilador y almohadilla, un subconjunto de tecnología de enfriamiento por evaporación.

El aire caliente del exterior de la envoltura primero pasa a través de un medio de celulosa húmedo antes de ingresar al espacio de crecimiento. Como resultado, el aire interior es más fresco y más húmedo. El enfriamiento por evaporación es más efectivo en climas secos, pero requiere un alto uso de agua, lo que puede ser una limitación para las granjas en áreas áridas del mundo.

El enfriamiento por niebla es una estrategia alternativa. En un invernadero enfriado por niebla, las plantas se empañan periódicamente con agua de rociadores / rociadores superiores hasta que el espacio alcanza la temperatura deseada para el cultivo. El enfriamiento por niebla utiliza menos agua que el enfriamiento por evaporación, pero aumenta la humedad relativa de un espacio en crecimiento. Si emparejado Con la estrategia de ventilación adecuada, el enfriamiento por niebla puede ser una tecnología de ahorro de agua especialmente adecuada para las regiones áridas (Ishii et al. 2016). Además, el enfriamiento por niebla disminuye la tasa de evapotranspiración en las plantas, lo cual es crítico para optimizar el metabolismo de las plantas en los sistemas acuapónicos (Goddek 2017). El invernadero insignia de las granjas Superior Fresh utiliza un sistema computarizado de

enfriamiento por niebla para mantener las temperaturas de cultivo durante la temporada de calor.

Los dispositivos de sombra también pueden contribuir a reducir las temperaturas del invernadero. Tradicionalmente, el blanqueo estacional de cal de los invernaderos se utilizó para reducir los niveles de radiación solar durante los meses más calurosos (Controlled Environment Agriculture 1973). Sin embargo, el sombreado se puede integrar con otras funciones de construcción. Una estrategia de sombreado prometedora es utilizar módulos fotovoltaicos semitransparentes para enfriar simultáneamente el espacio y producir energía (Hassanien y Ming 2017). El invernadero solar Aquaponic combina su matriz fotovoltaica con la funcionalidad de sombreado; Utiliza paneles giratorios de aluminio como dispositivos de sombra que funcionan como colectores solares con la ayuda de células fotovoltaicas montadas. El sistema fotovoltaico integrado transforma el exceso de radiación solar en energía eléctrica.

Iluminación: La principal ventaja de los invernaderos sobre los espacios de cultivo interiores es su capacidad de aprovechar la luz del día para facilitar la fotosíntesis. Sin embargo, las granjas en climas extremos pueden encontrar que satisfacer cargas de calefacción o enfriamiento para una envoltura transparente no es financieramente factible; En este caso, los agricultores pueden optar por cultivar en espacios de cultivo interiores con una envoltura aislada (Graamans et al.2018). Las granjas de acuaponía que operan en espacios de cultivo interiores dependen de una iluminación eléctrica eficiente para producir cultivos.

Muchos avances en la iluminación contemporánea de las granjas se originaron en fábricas de plantas japonesas, utilizadas para optimizar los rendimientos de las plantas en sistemas hidropónicos densos al reemplazar la luz solar con longitudes de onda de luz de ingeniería (Kozai et al. 2015). Actualmente, la iluminación LED es la opción más popular para los sistemas eléctricos de iluminación hortícola.

Son un 80% más eficientes que las lámparas de descarga de alta intensidad y un 30% más eficientes que sus equivalentes fluorescentes (Proksch 2017). Se sigue investigando la iluminación LED para optimizar la eficiencia energética y el rendimiento de los cultivos (Zhang et al. 2017). Invernaderos a gran escala como Superior Fresh, Wisconsin, EE. UU. Dependen de regímenes de iluminación suplementarios computarizados para extender el período de fotosíntesis de su cultivo en las latitudes del norte.
Generación de energía Restringida por los mismos factores que todos los

CEA, el manejo de energía de una granja acuapónica depende del clima exterior, la selección de cultivos, el sistema de producción y el diseño de la estructura (Graamans et al.2018). El cultivo de productos a través de acuaponía no es inherentemente sostenible si no se maneja adecuadamente: todos los factores anteriores pueden afectar la eficiencia energética para bien o para mal (Buehler y Junge, 2016). En muchos casos, el CEA consume más energía que la agricultura convencional de campo abierto; sin embargo, los mayores gastos de energía pueden justificarse si la forma en que obtenemos energía cambia a fuentes renovables y se incorporan estrategias eficientes para calefacción, refrigeración e iluminación en el diseño de la granja.

La generación de energía fotovoltaica (PV) puede desempeñar un papel importante en la compensación de los impactos operativos para la acuaponía en un ambiente controlado, reduciendo el medioambiente presión. En un ejemplo de un invernadero de alta tecnología en Australia, el uso de energía de un conjunto de PV causó una reducción del 50% en las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida en comparación con el escenario de red convencional (Rothwell et al.2016). La generación de energía renovable se puede combinar con granjas acuapónicas, si el espacio lo permite, por ejemplo, el invernadero acuapónico Lucky Clays Fresh en una granja rural en Carolina del Norte funciona con energía generada por turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos que se encuentran en otras partes de la parcela del propietario.

Agua: La eficiencia del uso del agua se ha citado a menudo como un beneficio importante de los sistemas de cultivo hidropónico y de CEA (Despommier 2013; Specht et al. 2014). Los sistemas acuapónicos son aún más adecuados para aumentar la eficiencia del agua, donde 1 kg de peces producidos en un sistema de acuicultura convencional requiere entre 2500 y 375,000 L, la misma cantidad de peces criados en un sistema acuapónico requiere menos de 100 L (Goddek et al. 2015). La captura de agua de lluvia y la reutilización de aguas grises se han propuesto como dos estrategias para compensar aún más los impactos de la cuenca hidrográfica al operar una granja hidropónica o acuapónica.

En el invernadero existente ICTA-ICP, 80-90% de las necesidades de agua para la producción de tomates en un sistema hidropónico agregado fueron cubiertas por la captura de agua de lluvia dentro de un año de operación (Sanjuan-Delmás et al.2018). Sin embargo, la capacidad de captura de agua de lluvia para satisfacer la demanda de cultivos depende del contexto climático.
En un estudio que evaluó la viabilidad de la producción de invernaderos en

tejados en parques minoristas existentes en ocho ciudades de todo el mundo, siete alcanzaron la autosuficiencia de los cultivos mediante la captura de agua de lluvia, solo Berlín no (Sanyé-Mengual et al.2018). Algunas instalaciones existentes de CEA ya reutilizan aguas grises para mejorar la eficiencia (Benke y Tomkins 2017). Sin embargo, la reutilización de aguas grises en un contexto urbano es actualmente limitada debido a la falta de apoyo regulatorio y la falta de investigación sobre los riesgos para la salud del uso de aguas grises en la agricultura. Piloto de reutilización de aguas grises, la Maison Productive en Montreal recolecta aguas grises de los usos domésticos para complementar su recolección de agua de lluvia para regar jardines y un invernadero comunitario para la producción de alimentos que comparten nueve unidades residenciales (Thomaier et al.2015). Con nuevos avances en la política sobre el tratamiento de aguas grises, la acuaponía integrada en el edificio puede aprovechar el ciclo del agua existente en lugar de depender de fuentes municipales.

Desde un punto de vista arquitectónico, es probable que la distribución de agua en un sistema acuapónico presente un desafío estructural. Los tanques de acuaponía pesan más que los lechos de cultivo hidropónicos y pueden limitar qué tipos de estructuras son factibles para retro adaptar una granja de acuaponía. El medio de cultivo también requiere consideración: los sistemas de cultivo en aguas profundas (DWC) requieren un gran y pesado volumen de agua, mientras que los sistemas de técnica de película de nutrientes (NFT) son livianos pero caros de fabricar (Goddek et al. 2015).

Nutrientes: En comparación con la agricultura de campo abierto convencional, el CEA reduce la necesidad de fertilizantes y pesticidas, ya que el agricultor puede separar físicamente el cultivo de las duras condiciones externas (Benke y Tomkins 2017). Sin embargo, debido a la densidad de un sistema de acuaponía, las enfermedades de plantas o peces pueden propagarse rápidamente si un patógeno infiltra el espacio. Las opciones preventivas, como el uso de insectos depredadores o medidas estrictas de control ambiental, como las entradas de "amortiguación", pueden evitar este riesgo (Goddek et al. 2015). La integración de diferentes necesidades de nutrientes para peces y cultivos es un desafío en los sistemas de acuaponía de recirculación única (Alsanius et al. 2017). En general, las plantas requieren concentraciones de nitrógeno más altas que las que pueden soportar los peces y la selección cuidadosa de cultivos y peces puede igualar los requerimientos de nutrientes para optimizar los rendimientos, pero aún es difícil de lograr. Se han propuesto sistemas desacoplados (DRAPS) para separar el ciclo del agua de la acuicultura del hidropónico para lograr las concentraciones deseadas de nutrientes, pero todavía no se aplica comúnmente en granjas comerciales (Suhl et al. 2016). Urban

Organics, con sede en St. Paul, Minnesota, EE. UU., Eligió desarrollar un sistema DRAPS para su segunda granja para optimizar tanto los rendimientos de cultivos como de peces y evitar la pérdida de cultivos en caso de desequilibrios de nutrientes dentro de los tanques de peces. ECF Farm en Berlín, Alemania, y Superior Fresh granjas en Wisconsin, EE. UU. También operan sistemas desacoplados para optimizar el crecimiento de peces y plantas.

Alternativamente, los ciclos de nutrientes acuapónicos pueden optimizarse mediante la introducción de un reactor anaeróbico para transformar los desechos de peces sólidos en fósforo digerible por las plantas (Goddek et al. 2016). Actualmente, The Plant en Chicago, EE. UU. Está planeando operar un digestor anaeróbico que puede desempeñar un papel en la optimización de los ciclos de nutrientes para el crecimiento de los cultivos. Los requisitos del sistema mecánico para DRAPS y la digestión anaeróbica influirán en el rendimiento, así como en el diseño espacial de una granja de acuaponía.

21.5.3 Impactos al final de la vida útil

Gestión de residuos de materiales: Una ventaja teórica de CEA sobre la agricultura de campo abierto es la capacidad de controlar la escorrentía de residuos de materiales, evitando la lixiviación (Despommier 2013; Gould y Caplow 2012). Un sobre cerrado puede desempeñar un papel en la gestión eficiente de los residuos de materiales. Una vía de reciclaje de desechos orgánicos para mejorar el rendimiento del edificio es el uso de tallos de plantas para la producción de biochar aislante, aunque esta investigación se encuentra en etapas tempranas (Llorach-Massana et al. 2017). Además, considerar la incorporación de componentes de gestión de residuos como un lecho de filtración, un digestor anaeróbico o un ventilador de recuperación de calor en el diseño del recinto en una etapa temprana puede cerrar los circuitos de energía, nutrientes y agua para la granja.

Distribución: Cadenas de embalaje ha sido un punto de acceso en varios LCA de granjas que evalúan el impacto de la producción. Es responsable de hasta el 45% del impacto total de un tomate en Bolonia, Italia, y es el mayor contribuyente a los impactos ambientales de los sistemas hidropónicos en interiores en Estocolmo, Suecia (Molin y Martin 2018b; Orsini et al. 2017; Rothwell et al. 2016). La ubicación de granjas acuapónicas cerca de los consumidores puede reducir la necesidad de envasado, almacenamiento y transporte como con otras formas de agricultura urbana, si los minoristas y distribuidores locales colaboran con los agricultores (Specht et al. 2014). Desafortunadamente, debido a la aceptación del consumidor, la mayoría de los minoristas a gran escala actualmente requieren que los envases de

plástico estándar para productos acuapónicos se vendan junto con las marcas convencionales, por lo tanto, seleccionar un sitio cerca de un consumidor El mercado de acuaponía en ambiente controlado no garantiza cambios significativos en el rendimiento general de la granja.

El transporte reducido, o millas de comida, a menudo se cita en la literatura como una ventaja importante de la agricultura urbana (Benke y Tomkins 2017; Despommier 2013; Sanjuan-Delmás et al.2018). Sin embargo, es importante tener en cuenta que la contribución relativa de las cadenas de transporte acortadas varía según el caso. En Singapur, donde casi todos los alimentos tienen que importarse de países vecinos, cortar las cadenas de transporte tiene sentido desde el punto de vista financiero y en términos de impacto ambiental (Astee y Kishnani, 2010). No se puede decir lo mismo de España, donde la cadena de suministro convencional de tomates de la granja a la ciudad ya es corta (Sanjuan- Delmás et al.2018). Las ciudades con las cadenas de suministro más largas pueden beneficiarse de la producción localizada de alimentos, pero los beneficios de reducir el transporte deben sopesarse frente a los impactos operativos y encarnados. En el caso de Boston, los beneficios de reducir el transporte fueron totalmente negados por el impacto de la calefacción y la operación de un invernadero dentro de la ciudad (Goldstein 2017).

A pesar de las largas cadenas de suministro de alimentos convencionales, los impactos del transporte fueron igualmente insignificantes en el panorama general del desempeño de CEA en Estocolmo (Molin y Martin 2018a).

Consumo y dieta: Las granjas de acuaponía en las ciudades pueden alterar las dietas urbanas, que juegan un papel importante en el impacto ambiental del consumo de alimentos (Benis y Ferrão 2017). El consumo de carne a través de la cadena convencional produce la mayor parte de la huella ambiental actual y la búsqueda de alternativas de proteínas tiene el potencial de tener un mayor impacto que la implementación generalizada de la agricultura urbana (Goldstein 2017). Dado que la acuaponía produce pescado y vegetales, este potencial para cambiar las dietas proteicas a gran escala no debe ignorarse en evaluaciones más grandes del desempeño ambiental.

21.6 ACUAPONÍA URBANA INTEGRADA

Cuando se diseñan deliberadamente con respecto al impacto ambiental, las granjas acuapónicas pueden convertirse en parte de un sistema alimentario urbano eficiente en recursos. Ninguna granja de acuaponía opera de

manera aislada ya que cuando los cultivos se cosechan y alcanzan la puerta de la granja, entran en una red alimentaria socioeconómica más grande a medida que el pescado y los productos se distribuyen a los clientes. En esta etapa, el rendimiento de las granjas de acuaponía ya no se limita al sistema de crecimiento y la envolvente: la economía, el marketing, la educación y el alcance social también están involucrados. Las granjas de acuaponía urbana deberán operar como negocios competitivos y buenos vecinos para integrarse exitosamente en la vida de la ciudad.

21.6.1 Viabilidad económica

La viabilidad económica de las granjas hidropónicas depende de muchos factores contextuales donde las cadenas de producción de peces convencionales locales y la cría en campo abierto deben coincidir (Stadler et al. 2017). Si bien la acuaponía requiere una inversión inicial relativamente costosa, puede superar a la agricultura convencional durante la fase de producción y distribución, donde el diseño del sistema de recirculación de agua reduce los costos del agua y reduce en gran medida la necesidad de fertilizantes, que generalmente comprenden entre 5% y 10% de costos generales de la granja (Hochmuth y Hanlon 2010). Sin embargo, estimar la viabilidad económica de las granjas de acuaponía es particularmente desafiante debido a la variedad de factores dinámicos que afectan el rendimiento, incluido el precio local de la mano de obra y la energía, que son dos ejemplos (Goddek et al. 2015). En un análisis económico de las granjas de acuaponía en el medio oeste de los Estados Unidos, la mano de obra constituía el 49% de todos los costos operativos a pesar de la suposición de que solo se pagarían los salarios mínimos. En realidad, la amplia gama de experiencia requerida para operar un sistema acuapónico probablemente justificará salarios más altos en un escenario de granja urbana (Quagrainie et al. 2018). La selección del sitio y el diseño del sobre tienen una relación directa con la rentabilidad de una granja de acuaponía al afectar la eficiencia de la operación y cuán amplio puede ser el mercado potencial. Las granjas de acuaponía ubicadas en entornos urbanos pueden acceder a múltiples mercados fuera de la producción agrícola, donde muchas granjas de acuaponía ofrecen recorridos, talleres, servicios de consultoría de diseño y suministro de sistemas de acuaponía en el patio trasero para aficionados. La integración de la agricultura con otros tipos de espacios dentro de los entornos urbanos puede contribuir a la salud financiera de las granjas de acuaponía. La granja acuaponía ECF se encuentra en el patio de trabajo del edificio industrial emblemático Malzfabrik, Berlín, Alemania, que opera un centro cultural y alberga espacios de trabajo para artistas y diseñadores.

21.6.2 Accesibilidad y Seguridad Alimentaria

La agricultura urbana a menudo se cita como una estrategia para proporcionar alimentos frescos a las comunidades marginadas ubicadas en desiertos alimentarios, sin embargo, pocas granjas urbanas comerciales se dirigen a este grupo demográfico, lo que demuestra que la agricultura urbana a escala comercial puede ser tan excluyente como las cadenas de suministro convencionales (Gould y Caplow 2012; Sanyé-Mengual et al.2018; Thomaier et al.2015). Las granjas de acuaponía que usan infraestructura de alta tecnología intentan canjear sus altas inversiones logrando precios superiores en los mercados urbanos, aunque la acuaponía también puede provenir de aplicaciones de base y de aficionados. La acuaponía también puede tener el potencial de aumentar la seguridad alimentaria de los residentes urbanos. Esto se evidencia en el legado duradero de Growing Power, una organización sin fines de lucro que, hasta hace poco, administraba una granja urbana en Milwaukee, Wisconsin, EE. UU., Iniciada por Will Allen en 1993. Muchos agricultores acuapónicos actuales asistieron a los talleres de Growing Power, en los cuales Allen defendió un modelo acuapónico que devuelve a la comunidad circundante por medio de cajas y clases de agricultura apoyadas por la comunidad. Iniciado por los programas educativos de Growing Power, otras organizaciones sin fines de lucro acuapónicas han tomado la antorcha como Dre Taylor con Nile Valley Aquaponics en Kansas City, Kansas, EE. UU. Esta granja tiene como objetivo proporcionar 100,000 libras (45,400 kg) de productos locales para la comunidad circundante en un nuevo campus galardonado para la granja en expansión (Fig. 21.14).

21.6.3 Educación y capacitación laboral

La acuaponía se puede utilizar como una herramienta educativa para promover el pensamiento sistémico y la conciencia ambiental (Junge et al. 2014; Specht et al. 2014). En aplicaciones urbanas, los sistemas de acuaponia podrían usarse para crear conciencia sobre los ciclos ecológicos de forma muy similar a las granjas existentes basadas en el suelo (Kulak et al. 2013). El Proyecto Invernadero en la ciudad de Nueva York traduce esto en un nuevo enfoque de la educación científica en las escuelas públicas.

El Proyecto Invernadero tiene como objetivo construir 100 invernaderos en la azotea de las escuelas públicas como aulas de ciencias. Estos invernaderos, personalizados para su doble misión de crecimiento y aprendizaje, incluyen un sistema de acuaponía. Sin embargo, los sistemas acuapónicos también requieren una mayor colaboración entre las disciplinas académicas existentes para avanzar en este nuevo campo académico multidisciplinario (Goddek et al. 2015). La colaboración de especialistas en acuicultura

Fig. 21.14 Propuesta del campus de Acuaponía del Valle del Nilo (Kansas City, Kansas, EE. UU.) Por HOK Architects.

y horticultura, ingenieros, estrategas de negocios y profesionales del medio ambiente construido, entre muchos otros, es necesaria para convertir la acuaponía en un contribuyente importante para el desarrollo urbano sostenible.

21.7 CONCLUSIONES

Hay una serie de criterios que contribuyen al desempeño de cada granja y su número crece con la cantidad de disciplinas involucradas en este campo interdisciplinario de acuaponía. Es de destacar un estudio anterior que ha proporcionado una definición de acuaponía y una clasificación de los tipos de acuaponía según el tamaño y el Sistema (Palm et al.2018). Muchos criterios para el análisis del tipo de recinto identificado en este estudio provienen del contexto inmediato de la granja: clima local, la calidad del contexto del entorno construido, prácticas de abastecimiento de energía, costos, mercado y marcos regulatorios locales.

Un invernadero acuaponico en un contexto rural funciona de manera diferente que uno en una ciudad, al igual que las granjas en climas áridos no comparten los mismos requisitos que sus contrapartes en áreas más frías. En general, los invernaderos clasificados como de tecnología solar pasiva y de tecnología media ofrecen una opción de cerramiento ambientalmente sostenible de menor costo, actualmente solo utilizada por operaciones acuaponicas más pequeñas. Sin embargo, debido a su nivel intencionalmente limitado de controles técnicos ambientales, solo funcio-

nan bien en zonas climáticas específicas. En comparación, los invernaderos de alta tecnología y en la azotea se puede implementar técnicamente en cualquier lugar, aunque en condiciones climáticas extremas generan altos costos operativos y mayores huellas ambientales. Estudios de casos recientes muestran que las instalaciones de cultivo en interiores pueden ser económicamente factibles, pero debido a su dependencia exclusiva de la iluminación eléctrica, su eficiencia en el uso de los recursos y la huella ambiental son motivo de preocupación. Se necesita más investigación para establecer la relación de granjas acuapónicas específicas y sus recintos con las redes de recursos existentes. Este trabajo puede ayudar a conectar la acuaponía con la investigación realizada sobre el metabolismo urbano.

Otros criterios que determinan la tipología y el rendimiento de la granja son internos. Estos incluyen niveles de control ambiental, selección de cultivos y peces, tipo y escala del sistema de acuaponía y tipo y escala del recinto. Adoptando un enfoque de ACV integrado, la relación entre todos los factores debe evaluarse a lo largo de la vida útil de la granja, desde la cuna hasta la tumba. La evaluación del ciclo de vida de las granjas de acuaponía debe incluir tanto los impactos de los edificios como los del sistema de cultivo, ya que hay una superposición en la fase de operación de la granja. Una serie de estrategias prometedoras en calefacción, refrigeración, iluminación y diseño de materiales puede mejorar la eficiencia general de la granja durante toda la vida útil de la granja. Más allá de tener en cuenta el impacto ambiental, LCA puede convertirse en un marco de diseño para expertos en horticultura, especialistas en acuicultura, arquitectos e inversores.

Continuar encuestando las granjas comerciales de acuaponía existentes es importante para validar los modelos de ACV, identificar estrategias y catalogar las operaciones de acuaponía que emergen a mayor escala. La combinación del modelado con la investigación de estudios de caso sobre acuaponía en ambiente controlado tiene el potencial de conectar la acuaponía con el alcance más amplio de la sostenibilidad urbana.

Agradecimientos Los autores de este estudio agradecen el apoyo financiero de la National Science Foundation (NSF) bajo el paraguas de la Iniciativa Global de Urbanización Sostenible (SUGI) Food Water Energy Nexus y el apoyo de todos los socios del proyecto CITYFOOD para proporcionar ideas e inspiración.

REFERENCIAS

Ackerman K (2012) The potential for urban agriculture in New York City: growing capacity, food security and green infrastructure report. Columbia

University Urban Design Lab, New York Alsanius BW, Khalil S, Morgenstern R (2017) Rooftop aquaponics. In: Rooftop urban agriculture, urban agriculture. Springer, Cham, pp 103–112. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57720-3_7 Astee LY, Kishnani NT (2010) Building integrated agriculture: utilising rooftops for sustainable food crop cultivation in Singapore. J Green Build 5:105–113. https://doi.org/10.3992/jgb.5.2.105

Benis K, Ferrão P (2017) Potential mitigation of the environmental impacts of food systems through urban and peri-urban agriculture (UPA) – a life cycle assessment approach. J Clean Prod 140:784–795. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.176

Benis K, Ferrão P (2018) Commercial farming within the urban built environment – taking stock of an evolving field in northern countries. Glob Food Sec 17:30–37. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.03.005

Benis K, Reinhart C, Ferrão P (2017a) Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of building-integrated agriculture (BIA) in urban contexts. J Clean Prod 147:589–602. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130

Benis K, Reinhart C, Ferrão P (2017b) Building-integrated agriculture (BIA) in urban contexts: testing a simulation-based decision support workflow. Presented at the Building Simulation 2017, San Francisco, USA, p 10. https://doi.org/10.26868/25222708.2017.479

Benke K, Tomkins B (2017) Future food-production systems: vertical farming and controlled- environment agriculture. Sustain Sci Pract Policy 13:13–26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Bregnballe J (2015) A guide to recirculation aquaculture: an introduction to the new environmen- tally friendly and highly productive closed fish farming systems. Food and Agriculture Orga- nization of the United Nations: Eurofish, Copenhagen

Buehler D, Junge R (2016) Global trends and current status of commercial urban rooftop farming. Sustainability 8:1108. https://doi.org/10.3390/su8111108

Ceron-Palma I, Sanyé-Mengual E, Oliver-Solà J, Rieradevall J (2012) Barriers and opportunities regarding the implementation of rooftop eco.greenhouses (RTEG) in mediterranean cities of Europe. J Urban Technol 19:87–103. https://doi.org/10.1080/10630732.2012.717685

Controlled Environment Agriculture (1973) A global review of greenhouse food production (No. 89), Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture

de Graaf PA (2012) Room for urban agriculture in Rotterdam: defining the spatial opportunities for urban agriculture within the industrialised city. In: Sustainable food planning: evolving theory and practice. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, pp 533–546. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-187-3_42

De La Salle JM, Holland M (2010) Agricultural urbanism. Green Frigate Books

Despommier D (2013) Farming up the city: the rise of urban vertical farms. Trends Biotechnol 31:388–389. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008

dos Santos MJPL (2016) Smart cities and urban areas–aquaponics as innovative urban agriculture. Urban For Urban Green 20:402–406. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.004

EU Aquaponics Hub (2017) COST Action FA1305, Aquaponics map (Cost FA1305), https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?ll¼50.77598474809961%2C12.62131196967971&z¼4&mid¼1bjUUbCtUfE_BCgaAf7AbmxyCpT0

Fang Y, Hu Z, Zou Y, Zhang J, Zhu Z, Zhang J, Nie L (2017) Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal-bacterial consortia. Bioresour Technol 245:358–364. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.116

Gao L-H, Qu M, Ren H-Z, Sui X-L, Chen Q-Y, Zhang Z-X (2010) Structure, function, application, and ecological benefit of a single-slope, energy-efficient solar greenhouse in China. HortTechnology 20:626–631

Goddek S (2017) Opportunities and challenges of multi-loop aquaponic systems. Wageningen University, Wageningen

Goddek S, Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir KV, Jijakli H, Thorarinsdottir R (2015) Challenges of sustainable and commercial Aquaponics. Sustainability 7:4199–4224. https://doi.org/10.3390/su7044199

Goddek S, Schmautz Z, Scott B, Delaide B, Keesman KJ, Wuertz S, Junge R (2016) The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce. Agronomy 6:37. https://doi.org/10.3390/agronomy6020037

Goldstein BP (2017) Assessing the edible city: environmental implications of urban agriculture in the Northeast United States. Technical University of Denmark, Lyngby

Goldstein B, Hauschild M, Fernández J, Birkved M (2016) Testing the environmental performance of urban agriculture as a food supply in northern climates. J Clean Prod 135:984–994. https://doi.org/10.10 16/jjclepro.2016.07.004

Gould D, Caplow T (2012) Building-integrated agriculture: a new approach to food production. In: Metropolitan sustainability: understanding and improving the urban environment. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp 147–170

Graamans L, Baeza E, van den Dobbelsteen A, Tsafaras I, Stanghellini C (2018) Plant factories versus greenhouses: comparison of resource use efficiency. Agric Syst 160:31–43. https://doi. org/10.1016/ j.agsy.2017.11.003

Hassanien RHE, Ming L (2017) Influences of greenhouse-integrated semi-transparent photovoltaics on microclimate and lettuce growth. Int J Agric Biol Eng 10:11–22. https://doi.org/10.25165/ijabe.v10i6.3407

He X, Qiao Y, Liu Y, Dendler L, Yin C, Martin F (2016) Environmental impact

assessment of organic and conventional tomato production in urban greenhouses of Beijing city, China. J Clean Prod 134:251–258. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.004

Hitaj C, Suttles S (2016) Trends in U.S. agriculture's consumption and production of energy: renewable power, shale energy, and cellulosic biomass, Economic information bulletin, no. 159. USDA/Economic Research Service, Washington, DC

Hochmuth GJ, Hanlon EA (2010) Commercial vegetable fertilization principles 17

INAPRO - Innovative Aquaponics for Professional Applications (2018). http://inapro-project.edu

Ishii M, Sase S, Moriyama H, Okushima L, Ikeguchi A, Hayashi M, Kurata K, Kubota C, Kacira M, Giacomelli GA (2016) Controlled environment agriculture for effective plant production sys- tems in a semiarid greenhouse. JARQ 50:101–113. https://doi.org/10.6090/jarq.50.101

Junge R, Wilhelm S, Hofstetter U (2014) Aquaponic in classrooms as a tool to promote system thinking. In: Transmission of innovations, knowledge and practical experience into everyday practice. Presented at the Conference VIVUS – on agriculture, environmentalism, horticulture and floristics, food production and processing and nutrition, Naklo, Slovenia, p 11

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic points in aquaponics. Water 9:182. https://doi.org/10.3390/w9030182

Khandaker M, Kotzen B (2018) The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. Aquac Res 49:1454–1468. https:// doi.org/10.1111/are.13601

König B, Junge R, Bittsanszky A, Villarroel M, Komives T (2016) On the sustainability of aquaponics. Ecocycles 2(1):26–32. https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i1.50

Körner O, Gutzmann E, Kledal PR (2017) A dynamic model simulating the symbiotic effects in aquaponic systems. Acta Hortic 1170:309–316. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1170.37

Kozai T, Niu G, Takagaki M (2015) Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Academic

Kulak M, Graves A, Chatterton J (2013) Reducing greenhouse gas emissions with urban agriculture: a life cycle assessment perspective. Landsc Urban Plan 111:68–78. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan. 2012.11.007

Lastiri DR, Geelen C, Cappon HJ, Rijnaarts HHM, Baganz D, Kloas W, Karimanzira D, Keesman KJ (2018) Model-based management strategy for resource efficient design and operation of an aquaponic system. Aquac Eng 83:27. https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.07.001

Llorach-Massana P, Lopez-Capel E, Peña J, Rieradevall J, Montero JI, Puy N (2017) Technical feasibility and carbon footprint of biochar co-production with tomato plant residue. Waste Manag 67:121–130. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.021

Maucieri C, Forchino AA, Nicoletto C, Junge R, Pastres R, Sambo P, Borin M

(2018) Life cycle assessment of a micro aquaponic system for educational purposes built using recovered mate- rial. J Clean Prod 172:3119–3127. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.097

Mohareb E, Heller M, Novak P, Goldstein B, Fonoll X, Raskin L (2017) Considerations for reducing food system energy demand while scaling up urban agriculture. Environ Res Lett 12:125004. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa889b

Molin E, Martin M (2018a) Assessing the energy and environmental performance of vertical hydroponic farming (No. C 299). ICL Swedish Environmental Research Institute, ICL Swedish Environmental Research Institute

Molin E, Martin M (2018b) Reviewing the energy and environmental performance of vertical farming systems in urban environments (No. C 298). ICL Swedish Environmental Research Institute, ICL Swedish Environmental Research Institute

Monsees H, Kloas W, Wuertz S (2017) Decoupled systems on trial: eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. PLoS One 12:e0183056. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056

Nadal A, Llorach-Massana P, Cuerva E, López-Capel E, Montero JI, Josa A, Rieradevall J, Royapoor M (2017) Building-integrated rooftop greenhouses: an energy and environmental assessment in the mediterranean context. Appl Energy 187:338–351. https://doi.org/10.1016/j. apenergy.2016.11.051

Orsini F, Dubbeling M, de Zeeuw H, Prosdocimi Gianquinto GG (2017) Rooftop urban agriculture, Urban agriculture (springer (firm)). Springer, Cham

Palm HW, Knaus U, Appelbaum S, Goddek S, Strauch SM, Vermeulen T, Jijakli M, Kotzen B (2018) Towards commercial aquaponics : a review of systems, designs, scales and nomencla- ture. Aquac Int 26(3):813–842. ISSN 0967-6120. https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z

Pattillo DA (2017) An overview of aquaponic systems: aquaculture components (No. 20), NCRAC Technical Bulletins. North Central Regional Aquaculture Center

Payen S, Basset-Mens C, Perret S (2015) LCA of local and imported tomato: an energy and water trade-off. J Clean Prod 87:139–148. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.007

Pearson LJ, Pearson L, Pearson CJ (2010) Sustainable urban agriculture: stocktake and opportuni- ties. Int J Agric Sustain 8:7–19. https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0468

Proksch G (2017) Creating urban agriculture systems: an integrated approach to design. Routledge, New York

Quagrainie KK, Flores RMV, Kim H-J, McClain V (2018) Economic analysis of aquaponics and hydroponics production in the U.S. Midwest. J Appl Aquac 30:1–14. https://doi.org/10.1080/10454438.2017.1414009

Rothwell A, Ridoutt B, Page G, Bellotti W (2016) Environmental performance of local food: trade- offs and implications for climate resilience in a

developed city. J Clean Prod 114:420–430. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.096

Sanjuan-Delmás D, Llorach-Massana P, Nadal A, Ercilla-Montserrat M, Muñoz P, Montero JI, Josa A, Gabarrell X, Rieradevall J (2018) Environmental assessment of an integrated rooftop greenhouse for food production in cities. J Clean Prod 177:326–337. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.147

Sanyé-Mengual E (2015) Sustainability assessment of urban rooftop farming using an interdisci- plinary approach. Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra

Sanyé-Mengual E, Oliver-Solà J, Montero JI, Rieradevall J (2015) An environmental and economic life cycle assessment of rooftop greenhouse (RTG) implementation in Barcelona, Spain. Assessing new forms of urban agriculture from the greenhouse structure to the final product level. Int J Life Cycle Assess 20:350–366. https://doi.org/10.1007/s11367-014-0836-9

Sanyé-Mengual E, Martinez-Blanco J, Finkbeiner M, Cerdà M, Camargo M, Ometto AR, Velásquez LS, Villada G, Niza S, Pina A, Ferreira G, Oliver-Solà J, Montero JI, Rieradevall J (2018) Urban horticulture in retail parks: environmental assessment of the potential implementation of rooftop greenhouses in European and south American cities. J Clean Prod 172:3081–3091. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.103

Simonen K (2014) Life cycle assessment. Routledge, London

Specht K, Siebert R, Hartmann I, Freisinger UB, Sawicka M, Werner A, Thomaier S, Henckel D, Walk H, Dierich A (2014) Urban agriculture of the future: an overview of sustainability aspect of food production in and on buildings. Agric Hum Values 31:33–51. https://doi.org/10.1007/s10460-013-9448-4

Stadler MM, Baganz D, Vermeulen T, Keesman KJ (2017) Circular economy and economic viability of aquaponic systems: comparing urban, rural and peri-urban scenarios under Dutch conditions. Acta Hortic 1176:101–114. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1176.14

Stewart ID, Oke TR (2010) Thermal differentiation of local climate zons using temperature observations from urban and rural field sites. Presented at the Ninth symposium on urban environment, Keystone, CO, p 8

Suhl J, Dannehl D, Kloas W, Baganz D, Jobs S, Scheibe G, Schmidt U (2016) Advanced aquaponics: evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. Agric Water Manag 178:335–344. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013

Thomaier S, Specht K, Henckel D, Dierich A, Siebert R, Freisinger UB, Sawicka M (2015) Farming in and on urban buildings: present practice and specific novelties of zero-acreage farming (ZFarming). Renewable Agric Food Syst 30:43–54. https://doi.org/10.1017/ S1742170514000143

Van Woensel L, Archer G, Panades-Estruch L, Vrscaj D, European Parliament, Directorate-General for Parliamentary Research Services (2015) Ten technologies which could change our lives: potential impacts and policy

implications: in depth analysis. European Commission/EPRS European Parliamentary Research Service, Brussels

Zabalza Bribián I, Aranda Usón A, Scarpellini S (2009) Life cycle assessment in buildings: state-of- the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. Build Environ 44:2510–2520. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001

Zhang H, Burr J, Zhao F (2017) A comparative life cycle assessment (LCA) of lighting technologies for greenhouse crop production. Journal of Cleaner Production, Towards eco-efficient agriculture and food systems: selected papers addressing the global challenges for food systems, including those presented at the Conference "LCA for Feeding the planet and energy for life" (6–8 October 2015, Stresa & Milan Expo, Italy) 140:705–713. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.014

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

5 Parte

ACUAPONÍA Y EDUCACIÓN

Capítulo 22

LA ACUAPONÍA COMO HERRAMIENTA EDUCATIVA

Ranka Junge, Tjasa Griessler Bulc, Dieter Anseeuw, Hijran Yavuzcan Yildiz, and Sarah Milliken

Capítulo 22

LA ACUAPONÍA COMO HERRAMIENTA EDUCATIVA

Ranka Junge, Tjasa Griessler Bulc, Dieter Anseeuw, Hijran Yavuzcan Yildiz, and Sarah Milliken*

Resumen

Este capítulo proporciona una visión general de las posibles estrategias para implementar acuaponía en los planes de estudio en diferentes niveles de educación, ilustrado por estudios de caso de diferentes países. La acuaponía puede promover la alfabetización científica y proporcionar una herramienta útil para la enseñanza de las ciencias naturales en todos los niveles, desde la educación primaria hasta la terciaria. Un sistema modelo de aula de acuaponía puede proporcionar múltiples formas de enriquecer las clases de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM), y el mantenimiento diario de una acuaponía también puede permitir el aprendizaje experimental. Por lo tanto, la acuaponía puede convertirse en una forma agradable y efectiva para que los alumnos estudien el contenido de STEM, y también se puede utilizar para enseñar temas como negocios y economía, y para abordar temas como el desarrollo sostenible, las ciencias ambientales, la agricultura, los sistemas alimentarios y la salud. Utilizando evaluaciones de estudiantes y docentes sobre el uso de acuaponía en diferentes niveles educativos, intentamos responder a la pregunta de si la acuaponía cumple su promesa como herramienta educativa.

Palabras clave: Acuaponía; Educación; Curso de acuaponía; Formación profesional; Educación superior; Encuesta.

R. Junge (*)
Institute of Natural Resource Sciences Grüenta, Zurich University of Applied Sciences, Wädenswil, Switzerland
E-mail: ranka.junge@zhaw.ch
T. G. Bulc
Faculty of Health Sciences, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia
E-mail: tjasa.bulc@zf.uni-lj.si
D. Anseeuw
Inagro, Roeselare, Belgium
E-mail: info@inagro.be
H. Yavuzcan Yildiz
Department of Fisheries and Aquaculture, Ankara University, Ankara, Turkey
E-mail: yavuzcan@ankara.edu.tr
S. Milliken
School of Design, University of Greenwich, London, UK
E-mail: S.Milliken@greenwich.ac.uk

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_22

22.1 INTRODUCCIÓN

Acuaponía no es solo una tecnología de producción de alimentos con visión de futuro; También promueve la alfabetización científica y proporciona una muy buena herramienta para enseñar las ciencias naturales (ciencias de la vida y físicas) en todos los niveles de educación, desde la escuela primaria (Hofstetter 2007, 2008; Bamert y Albin 2005; Bollmann-Zuberbuehler et al. 2010; Junge et al. 2014) a la educación profesional (Baumann 2014; Peroci 2016) y a nivel universitario (Graber et al. 2014).

Un sistema modelo de salón de clases acuaponía ofrece múltiples formas de enriquecer las clases de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas (STEM). El enfoque "práctico" también permite el aprendizaje experimental, que es el proceso de aprendizaje a través de la experiencia física, y más precisamente el proceso de "creación de significado" de la experiencia directa de un individuo (Kolb 1984). La acuaponía puede convertirse en una forma agradable y efectiva para que los alumnos estudien el contenido STEM. También se puede usar para enseñar materias como negocios y economía, abordando temas como el desarrollo sostenible, las ciencias ambientales, la agricultura, los sistemas alimentarios y la salud (Hart et al. 2013).

Se puede construir una acuaponía básica de manera fácil y económica. La red mundial un repositorio de muchos ejemplos de videos e instrucciones sobre cómo construir acuaponía a partir de una variedad de componentes, lo que resulta en una variedad de diferentes tamaños y configuraciones. Investigaciones recientes de uno de estos prototipos de micro-acuaponía mostraron que, a pesar de ser pequeño, puede imitar una unidad a gran escala y es una herramienta de enseñanza efectiva con un impacto ambiental relativamente bajo (Maucieri et al. 2018). Sin embargo, implementar acuaponía en las aulas no está exento de desafíos. Hart y col. (2013) informan que las dificultades técnicas, la falta de experiencia y conocimiento y el mantenimiento durante los períodos de vacaciones pueden representar barreras significativas para los maestros que usan acuaponía en la educación, y que el desinterés por parte del maestro también puede ser un factor crucial (Graham et al. 2005; Hart et al. 2014). Clayborn y col. (2017), por otro lado, mostró que muchos educadores están dispuestos a incorporar acuaponía en el aula, particularmente cuando se proporciona un incentivo adicional, como la experiencia práctica. Wardlow y col. (2002) investigaron las percepciones de los docentes sobre la unidad de acuaponía como un sistema de aula y también ilustraron una unidad prototipo que se puede construir fácilmente. Todos los maestros estuvieron de acuerdo en que traer una unidad de acuaponía al aula es inspirador para los estudian-

tes y condujo a una mayor interacción entre estudiantes y maestros, contribuyendo así a un diálogo sobre ciencias. Por otro lado, no está claro exactamente cómo los maestros y los estudiantes hicieron uso de la acuaponía y los materiales de instrucción ofrecidos. Por lo tanto, aún falta la información necesaria para evaluar el impacto de las clases de acuaponía en el cumplimiento de los objetivos del plan de estudios de los estudiantes. En una encuesta sobre el uso de acuaponía en la educación en los Estados Unidos (Genello et al. 2015), los encuestados indicaron que la acuaponía a menudo se usaba para enseñar asignaturas, que se centran más exclusivamente en temas STEM. La educación en acuaponía en las escuelas primarias y secundarias está centrada en la ciencia, orientada a proyectos y orientada principalmente a estudiantes mayores, mientras que la acuaponía en la universidad y la universidad generalmente era más grande y estaba menos integrada en el plan de estudios. Las materias interdisciplinarias como los sistemas alimentarios y las ciencias ambientales se enseñaron utilizando una acuaponía con mayor frecuencia en los colegios y universidades que en las escuelas, donde el enfoque se centró con mayor frecuencia en materias de una sola disciplina, como la química o la biología. Curiosamente, solo unas pocas escuelas vocacionales y técnicas usaron acuaponía para enseñar otras materias además de acuaponía. Esto indica que, para estos educadores, la acuaponía es un tema independiente y no un vehículo para abordar temas de STEM o del sistema alimentario (Genello et al. 2015).

Si bien los estudios mencionados anteriormente informaron que la acuaponía tiene el potencial de alentar el uso de la experimentación y el aprendizaje práctico, no evaluaron el impacto de la acuaponía en los resultados del aprendizaje. Junge y col. (2014) evaluaron la acuaponía como una herramienta para promover el pensamiento sistémico en el aula. Los autores informaron que los estudiantes de 13 a 14 años (séptimo grado en Suiza) mostraron un aumento estadísticamente significativo de pre a post examen para todos los índices medidos para evaluar sus capacidades de pensamiento de sistemas. Sin embargo, dado que los alumnos no tenían ningún conocimiento previo del pensamiento sistémico, y dado que no había un grupo de control, los autores concluyeron que se necesitan pruebas complementarias para evaluar si la acuaponía tiene beneficios adicionales en comparación con otras herramientas de enseñanza. Este problema fue abordado en el estudio de Schneller et al. (2015) que encontraron avances significativos en los puntajes de conocimiento ambiental en estudiantes de 10–11 años en comparación con un grupo de control de 17 años. Además, cuando se les preguntó por sus preferencias de enseñanza, la mayoría de los estudiantes indicaron que preferían la pedagogía experimental práctica como la acuaponía o la hidroponía. La mayoría de

los estudiantes también discutieron el plan de estudios con sus familias, explicando cómo funcionan los cultivos hidropónicos y acuapónicos. Esta observación amplía la creencia de que el aprendizaje práctico con acuaponía (e hidroponía) no solo tiene un impacto estimulante en maestros y estudiantes, sino que también conduce al aprendizaje intergeneracional.

El objetivo de este capítulo es proporcionar una visión general de las posibles estrategias para implementar acuaponía en los planes de estudio en diferentes niveles de educación, ilustrado por estudios de caso de diferentes países. En base a las evaluaciones realizadas con algunos de estos estudios de caso, intentamos responder a la pregunta de si la acuaponía cumple su promesa como herramienta educativa.

22.2 ESCENARIOS GENERALES PARA IMPLEMENTAR LA ACUAPONÍA EN LOS PLANES DE ESTUDIO

La introducción de la acuaponía en las escuelas puede ser una aspiración, pero en muchos países, las escuelas primarias y secundarias tienen planes de estudio rígidos con objetivos de aprendizaje que deben cumplirse al final de cada año escolar. Comúnmente, estos objetivos, llamados términos de logro o competencias de resultados, son específicos del curso y definidos por las autoridades educativas. Por lo tanto, esto requiere una estrategia bien pensada para introducir con éxito una acuaponía en las clases escolares. En comparación, las universidades y las universidades tienen más libertad para trazar sus propios planes de estudio.

22.2.1 ¿Qué tipos de acuaponía son adecuados para la educación?

Hay, como se indicó anteriormente, muchos acuaponía descritos e ilustrados en la web. También es posible comprar un kit o tener un sistema completo entregado e instalado. Sin embargo, construir una acuaponía es

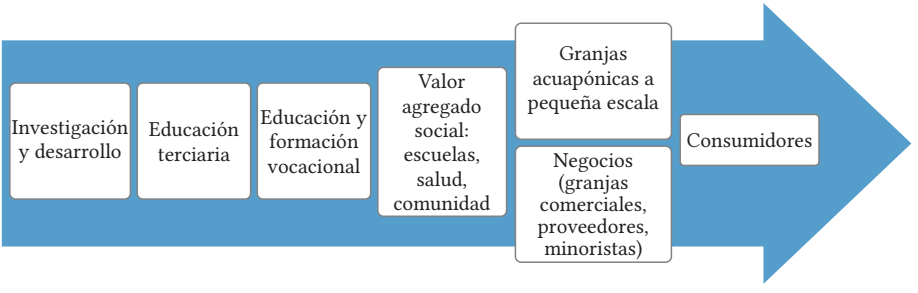


Fig. 22.1 Un acuaponía puede abordar varios objetivos o partes interesadas al ofrecer desarrollar competencias clave en procesos educativos y de capacitación apropiados.
(Modificado después de Graber et al. 2014)

en sí mismo una experiencia educativa valiosa, y el hecho de que no se entregue en el aula listo para usar aumenta su valor educativo.

Una acuaponía puede abordar varios objetivos o partes interesadas (Fig. 22.1). Para lograr todo esto, los componentes de un sistema deben cumplir varios requisitos (Tabla 22.1). La elección de qué tipo de acuaponía es adecuada para una institución en particular debe ser el resultado de una evaluación realista de sus instalaciones y los objetivos educativos.

Maucieri y col. (2018) propusieron una clasificación general de acuaponía de acuerdo con diferentes principios de diseño. Si bien un sistema puede

Tabla 22.1 Requisitos generales para tres tipos de acuaponía educativa

Aspectos	**Investigación (básica y aplicada)**	**Educación terciaria (Bsc, MSc, PhD)**	**Valor agregado social: educación (primaria y secundaria), formación profesional, comunicación, beneficios de salud**
Acceso	Buen acceso para el trabajo diario y el monitoreo,	Buen acceso para el trabajo diario y el monitoreo; Buen acceso para grupos	Buen acceso para grupos
Tamaño	Tamaño razonable para la ampliación de las granjas comerciales potenciales (dependiendo del cultivo)	Tamaño razonable para una buena visión general de las diferentes opciones de cultivo.	Tamaño razonable para una buena visión general
Construcción	Fácil remodelación[a]	Fácil remodelación	Elementos comerciales en su mayoría comerciales
Control Climático	Avanzado	Básico	Básico
Diversos métodos de producción	Variable según proyectos de investigación actuales.[b]	Variable a alta: desde básico (demostración del sistema) hasta vanguardia (investigación)	Alta: desde básica (demostración del sistema) hasta vanguardia (demostración de potencial)
Reciclaje, sistemas de circuito cerrado	Importancia cuantitativa: mejorar la huella ecológica y, por lo tanto, reducir costos	Importancia cuantitativa y cualitativa	Importancia cualitativa: demostración de principios ecológicos.
Provisión de energía de fuentes renovables.	Importancia cuantitativa: mejorar la huella ecológica y, por lo tanto, reducir costos	Importancia cuantitativa y cualitativa	Importancia cualitativa: demostración de principios ecológicos.
Recolección, tratamiento y uso de agua de lluvia.	Importancia cuantitativa: mejorar la huella ecológica y, por lo tanto, reducir costos	Importancia cuantitativa y cualitativa	Importancia cualitativa: demostración de principios ecológicos.

Modificado después Graber et al. (2014)
[a]permite probar diferentes configuraciones
[b]desde lo último en tecnología (alineado con las prácticas actuales de los productores profesionales de hortalizas y granjeros de pescado) hasta lo último (probando métodos de producción innovadores)

cumplir simultáneamente varios objetivos, incluidos el enverdecimiento y la decoración, la interacción social y la producción de alimentos, aquí asumimos que el objetivo principal es la educación. Si seguimos la clasificación de Maucieri et al. (2018), que clasifica la acuaponía de acuerdo con varias categorías (parte interesada, tamaño), surgen varias opciones distintas para elegir una acuaponía adecuada (Tabla 22.2). Cualquier decisión debe tomarse dentro de los límites del presupuesto disponible, aunque es posible construir un sistema a un costo muy bajo.

Las preguntas adicionales que se deben hacer antes de instalar una acuaponía son:

- ¿Qué tamaño de sistema elegir? El tamaño del sistema probablemente aumentará en relación con la edad de los estudiantes: sistemas más pequeños en el jardín de infantes y sistemas más grandes en la escuela secundaria.
- ¿Dónde se ubicará el sistema? Los microsistemas (Tabla 22.2) se pueden colocar en un aula. Sin embargo, los sistemas muy pequeños y pequeños (Tabla 22.2) requieren más espacio y tal vez sea necesario construir un invernadero para albergarlos.
- ¿El sistema será una característica temporal o permanente? Si va a ser una característica permanente, ¿quién se encargará del sistema durante las vacaciones? Si va a ser una característica temporal, la institución podría considerar pedir prestado un acuario de un acuarista entre el personal o los estudiantes, quienes también podrían dar consejos sobre el cuidado de los peces.
- ¿Se va a cosechar el pescado? El bienestar animal siempre debe observarse y la matanza de peces debe realizarse de acuerdo con las leyes de protección animal (Consejo de la Unión Europea 1998). Los niños pueden tener problemas para matar y comer un animal vivo, que se parece a Dory (de la película que encuentra a Nemo). Si los peces no se van a cosechar, entonces los peces dorados o Koi son una buena opción.
- ¿Se van a cosechar y comer las plantas? En caso afirmativo, se deben preparar sugerencias para usar el producto. Si no, entonces considere usar plantas ornamentales en su lugar.

22.2.2 ¿Cómo incrustar la acuaponía como herramienta didáctica?

Una acuaponía con peces vivos y plantas obviamente proporciona el potencial para un compromiso a largo plazo en comparación con los experimentos científicos convencionales de una sola disciplina. Si bien este es un activo manifiesto para el aprendizaje experimental progresivo y continuo, se ha indicado que salvaguardar el interés del maestro a largo

Tabla 22.2 Idoneidad de diferentes opciones de diseño para una acuaponía educativa. El color verde indica las opciones más adecuadas, las opciones amarillas son menos adecuadas, mientras que las opciones rojas no son adecuadas para la mayoría de los casos.

Size	Operational mode of the aquaculture compartment	Water cycle management	Water type	Type of implemented hydroponic system	Use of space
XXS micro systems (<5 m^2)	Extensive[a]	Closed loop systems[c]	Freshwater (Tap or Well)	Grow beds with different media	Horizontal
XS very small (5-50 m^2)	Intensive[b]	Open loop systems[d]	Rainwater	Ebb-and-flow system	Vertical
S small (51-200 m^2)			Salt / Brackish water	Grow bags	
M medium (201-1000 m^2)				Drip irrigation	
L large (>1000 m^2)				Deep water cultivation (rafts)	
				Nutrient film technique (NFT)	

[a] *Extenso (la densidad de peces es mayormente inferior a 10 kg/m³ y permite el uso integrado de lodos en camas de cultivo).*
[b] *Intensivo (la densidad del pescado requiere una separación adicional del lodo; sin embargo, el lodo debe tratarse por separado).*
[c] *Circuito cerrado (sistemas "acoplados"): después del componente hidropónico, el agua se recicla al componente de acuicultura.*
[d] *Circuito abierto o extremo de la tubería (sistemas "desacoplados"): después del componente hidropónico, el agua no se recicla parcialmente o solo al componente de acuicultura.*

plazo y la provisión de material de aprendizaje son desafíos clave para incorporar con éxito la acuaponía en las clases escolares (Hart et al. 2013; Clayborn et al. 2017).

Idealmente, el modelo de acuaponía debe integrarse en diferentes clases de manera que facilite el logro de los objetivos educativos específicos del curso. Los temas, que promueven una comprensión de los ciclos naturales, el reciclaje de residuos y la protección del medio ambiente, son los más obvios. Sin embargo, la acuaponía también se puede utilizar en otras materias, como arte, ciencias sociales y economía. Los ejemplos discutidos en los Ejemplos 22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6 y 22.7 a continuación proporcionan una idea de la versatilidad de la acuaponía en la educación.
La acuaponía activa se puede utilizar para enseñar durante diferentes períodos de tiempo y, en consecuencia, hay distintos escenarios:

(a) Durante un trimestre, 1–2 clases por semana (8–12 semanas) (ver Ejemplos 22.1 y 22.3)
(b) Como una actividad educativa de medio a un día (ver Ejemplo 22.4)
(c) Como Semana de la Ciencia o Semana del Proyecto en 2–5 días consecutivos (ver Ejemplo 22.2)
(d) Como una actividad extracurricular, durante un período de 10–15 semanas
(e) Como una característica permanente para toda la escuela, proporcio-

nando así una "pieza de conversación" focal y un centro de estudio / investigación para varias clases (ver Ejemplos 22.5 y 22.6, Graber et al. 2014)

22.3 ACUAPONÍA EN ESCUELAS PRIMARIAS

De acuerdo con la Clasificación Internacional Estándar de Educación (UNESCO-UIS 2012), la educación primaria (o educación primaria en inglés americano) en el nivel CINE 1 (primeros 6 años) suele ser la primera etapa de la educación formal. Proporciona a los niños de entre 5 y 12 años una comprensión básica de varias materias, como matemáticas, ciencias, biología, alfabetización, historia, geografía, artes y música. Por lo tanto, está diseñado para proporcionar una base sólida para aprender y comprender áreas centrales de conocimiento, así como el desarrollo personal y social. Se centra en el aprendizaje en un nivel básico de complejidad con poca, si alguna, especialización. Las actividades educativas a menudo se organizan con un enfoque integrado en lugar de proporcionar instrucción en materias específicas.

El objetivo educativo en el nivel CINE 2 (otros 3 años) es sentar las bases para el aprendizaje a lo largo de toda la vida y el desarrollo humano sobre los cuales los sistemas educativos pueden expandir más oportunidades educativas. Los programas en este nivel generalmente se organizan en torno a un plan de estudios más orientado a las asignaturas.

Según el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF 2018), proporcionar a los niños educación primaria tiene muchos efectos positivos, incluida una mayor conciencia ambiental.

En la escuela primaria, la comprensión rica pero ingenua del mundo natural de los niños puede desarrollarse para desarrollar su comprensión de los conceptos científicos. Al mismo tiempo, los niños necesitan experiencias cuidadosamente estructuradas, teniendo en cuenta sus conocimientos previos, el apoyo educativo de los maestros y las oportunidades para una participación sostenida con el mismo conjunto de ideas durante períodos más largos (Duschl et al. 2007). Uno la forma de proporcionar un compromiso continuo y continuo puede ser mediante la construcción, gestión y mantenimiento de una acuaponía.

El consejo clave para presentar acuaponía a los estudiantes de primaria es el siguiente:

- Los sistemas de clase robustos y de baja tecnología favorecen la partici-

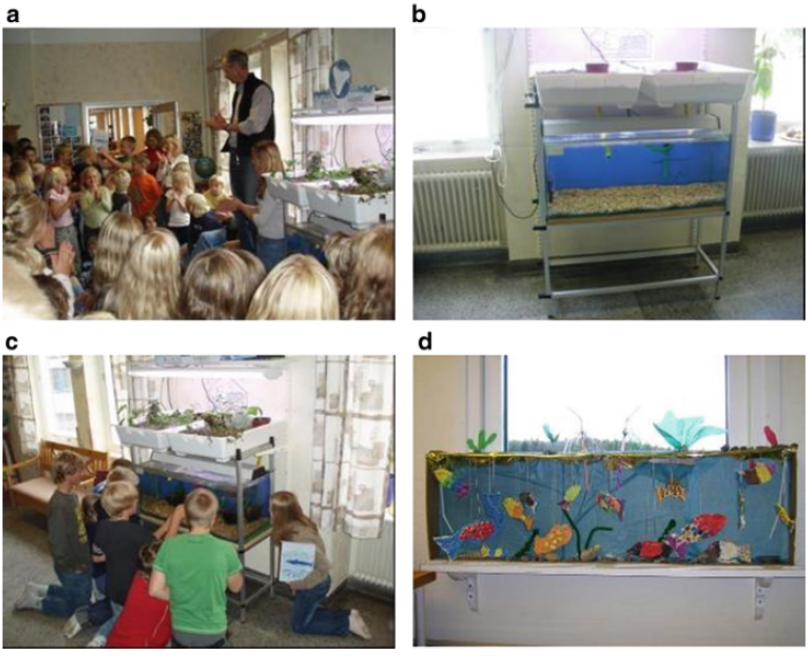


Fig. 22.2 (a) Ceremonia de apertura en la escuela de Älandsbro, (b) Acuaponía simple en Älandsbro, (c) Estudiantes mayores que hacen observaciones para el "Libro de recirculación", (d) Modelo construido por los estudiantes más jóvenes durante una clase de arte.

pación tanto del maestro como de los alumnos y son más efectivos para esta etapa de la educación (Ejemplo 22.1, Fig. 22.2b).

- La productividad no es un tema central, pero sí lo es demostrar las leyes de la naturaleza (ciclo de nutrientes, flujo de energía, dinámica de la población e interacciones dentro del ecosistema). Por lo tanto, se debe hacer un esfuerzo suficiente para desarrollar materiales de aprendizaje para cumplir con los objetivos del plan de estudios.

- Desde un punto de vista educativo, comprender el químico, físico y los procesos naturales en una acuaponía, aunque a través de prueba y error, son más importantes que lograr un sistema perfectamente ejecutado.

- Incluya una amplia gama de actividades: dibujar las plantas y los animales, llevar un diario de la clase, medir la calidad del agua, monitorear los peces (tamaño, peso y bienestar), alimentar a los peces, cocinar los productos, juegos de roles, escribir, prosa, poesía y canción.

Ejemplo 22.1 Acuaponía en Älandsbro skola, escuela primaria (Suecia)
El proyecto de 10 meses, que era parte del proyecto FP6 "Jugar con agua", comenzó con una ceremonia de apertura en septiembre (Fig. 22.2a) y terminó antes del verano Días festivos. Participaron varios maestros y alrededor de 90–100 estudiantes con edades comprendidas entre 9 y 12 años y estaban muy entusiasmados con el proyecto. La escuela usó materiales fácilmente disponibles para crear dos sistemas simples de mesa con un acuario, peces y plantas (Fig. 22.2b). Antes del inicio de las actividades de aprendizaje, los estudiantes completaron un cuestionario (consulte la sección Evaluación), que luego se repitió al final del trimestre. Después de una introducción a la acuaponía, los estudiantes plantaron el sistema y lo poblaron con peces.

Se mantuvo un diario, llamado "Libro de recirculación", para cada acuario. Los estudiantes tomaron notas diarias sobre los sistemas (Fig. 22.2c). Registraron el pH, la temperatura, las concentraciones de nitrato y nitrito, la longitud de las plantas, la actividad de los peces y cuándo agregaron alimentos y agua al sistema. También hicieron dibujos y describieron cualquier evento significativo que ocurriera.

Las diferentes clases en la escuela tenían semanas diferentes donde asumían la responsabilidad diaria de los sistemas. Los estudiantes más jóvenes se ocuparon de un sistema, mientras que el segundo fue utilizado por los niños mayores.

Las unidades de acuaponia se utilizaron para enseñar diferentes materias. Los estudiantes más jóvenes trabajaron con el concepto de recirculación construyendo modelos de cartón de un acuaponía, con tubos, bombas, peces y plantas (Fig. 22.2d). También trabajaron con pinturas, teatro y música para aumentar su comprensión de la relación entre las plantas y los peces.

Los estudiantes mayores recopilaron información sobre el pH, la temperatura, el nitrato, el nitrito y otros cambios en el "Libro de recirculación". Buscaban diferentes temas, por ejemplo: (i) el ciclo del agua en una perspectiva global; (ii) el uso diario del agua en una casa; (iii) las diferentes apariencias, olores y sabores del agua; (iv) biología y ecología de peces; (v) otros sistemas de recirculación ecológica; y (vi) la importancia del agua a escala mundial. También enseñaron a los alumnos más jóvenes, por ejemplo, explicando los sistemas de recirculación o demostrando pequeños experimentos.

Para la evaluación, ver Sect. 22.8.1.2.

Ejemplo 22.2 Curso de dos días centrado en acuaponia en Waedenswil, Suiza

Durante 2 días, 16 estudiantes (de 13 a 14 años) y su maestro de la Escuela Gerberacher visitaron el campus de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich (ZHAW) en Waedenswil, donde un estudiante universitario había preparado un programa de dos días sobre la importancia de agua utilizando acuaponia como foco (Fig. 22.6). La progresión del aprendizaje se evaluó mediante un cuestionario (pre-actividad y post-actividad).

Día 1:

- Dirección de bienvenida, explicación del horario del curso.
- Prueba de conocimiento (qué saben los estudiantes sobre acuicultura, reciclaje, nutrición vegetal, ecosistemas, etc.)
- El concepto de "sistemas" explicado por analogía simple con martillo como un ejemplo de un sistema (el martillo está hecho de dos partes: el mango y la cabeza. Si las partes están separadas, el martillo no puede funcionar. Entonces, el martillo es más que la suma de sus partes, es un sistema).
- Evaluación de la comprensión de los sistemas antes de la unidad de enseñanza: ¿Qué es un sistema? Rellene el texto vacío.
- Introducción a la acuaponia y los ecosistemas. Los estudiantes aprenden qué es un ecosistema y entienden que los sistemas individuales están integrados en él.
- Visita a la demostración de acuaponia (Fig. 22.3a).
- Ampliar el conocimiento: la importancia de las proteínas en los alimentos. Discuta y complete el texto del hueco.
- Ampliar el conocimiento: los beneficios de un ciclo cerrado del agua (Discuta y complete en la Hoja de trabajo).
- Trabajo práctico: construcción de dos acuaponías simples, agregando plantas (albahaca), midiendo nitrito y pH.
- Conceptos básicos de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y albahaca, *Ocimum basilicum* biología.
- Importancia global del agua (juego de rol, hojas de trabajo).
- Tiempo para preguntas.

Día 2:

- ¿Por qué es necesaria la conservación del agua? ¿Cuántas personas mueren por falta de agua potable? (Tarea de matemáticas).
- Mida el pH y el contenido de nitrito en los acuarios. Los estudiantes aprenden cómo llevar a cabo un Aqua-Test y lo que indican los valores.
- Responder preguntas de repetición (juego de cartas con recompensas, hojas de trabajo).
- Trabajo práctico: Transfiera la tilapia del acuario a la acuaponía.
- Alimenta a los peces. Complete la hoja de observación de peces.
- Dibuje un póster de acuaponía, explicando los términos importantes (Fig. 22.3b).
- Prueba de conocimiento final y evaluación de la unidad de aprendizaje (véase también la sección. 22.8.1.3).

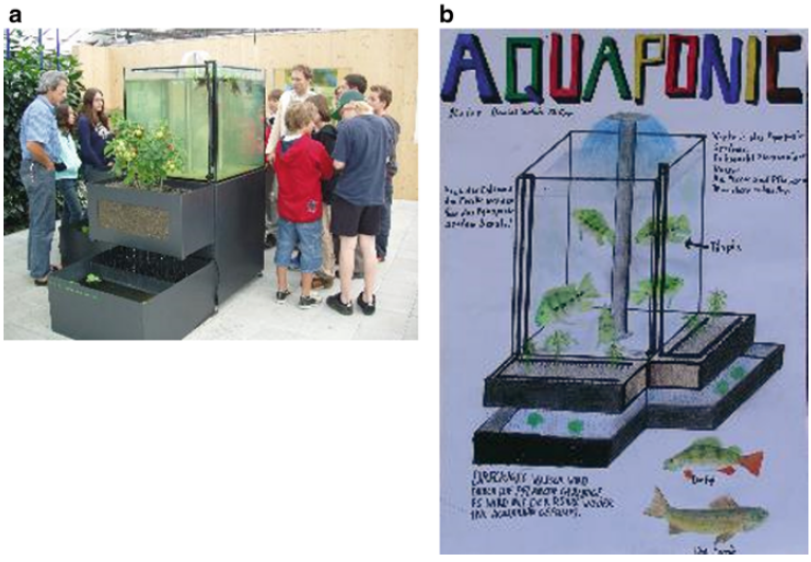


Fig. 22.3 (a) Estudiantes del sexto grado de la Escuela Gerberacher que visitan la demostración de acuaponía en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zurich (Waedenswil, Suiza). (b) Un póster diseñado por los mismos estudiantes, explicando los conceptos básicos de acuaponía.

22.4 ACUAPONÍA EN LAS ESCUELAS SECUNDARIAS

Según la clasificación CINE (UNESCO-UIS 2012), la educación secundaria proporciona actividades educativas y de aprendizaje que se basan en la educación primaria y se preparan tanto para la primera entrada en el mercado laboral como para la educación postsecundaria no terciaria y terciaria. En términos generales, la educación secundaria tiene como objetivo entregar el aprendizaje en un nivel intermedio de complejidad.

Mientras que, en el nivel de educación primaria, los estudiantes se dirigen principalmente hacia ejercicios observacionales y descriptivos sobre organismos y procesos en una acuaponía, los estudiantes de las escuelas secundarias pueden ser educados en la comprensión de procesos dinámicos. La acuaponía permite esta mayor complejidad y fomenta el pensamiento del sistema (Junge et al. 2014).

Ejemplo 22.3 Curso de un semestre en una escuela primaria en Suiza
Hofstetter (Hofstetter 2008) implementado unidades de enseñanza de acuaponía en un Grammar School (alemán: Gymnasium) en Zurich y probó la hipótesis de que la incorporación de la acuaponia en la enseñanza tiene una influencia positiva en el pensamiento sistémico (Ossimitz 2000) entre los estudiantes. Estudiantes de gimnasio en Suiza pertenece a una sección

superior a la media de la población estudiantil: tienen muy buenas calificaciones, están acostumbrados al trabajo autónomo y muestran una capacidad constante e intereses generales en diferentes temas. Participaron tres clases de séptimo grado, con un total de 68 estudiantes (32 mujeres, 36 hombres), con edades entre 12 y 14 años de edad.

Seis sistemas acuapónicos pequeños se construyeron de acuerdo con la descripción general de Bamert y Albin (2005) (Fig. 22.4). Los estudiantes fueron responsables de la construcción, operación y monitoreo de los sistemas. Se les proporcionaron los materiales necesarios y se construyeron las unidades de acuicultura e hidropónicas. Se plantaron plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) y albahaca (*Ocimum basilicum*) en lechos de arcilla expandida. Cada acuario fue abastecido con dos timones comunes (*Scardinius erythrophthalmus*) atrapados en un estanque cercano y regresaron allí después del experimento.

Cada sistema fue monitoreado diariamente, y se llevaron a cabo las siguientes operaciones: medir la altura de la planta, observar la salud de la planta, medir el alimento de los peces y alimentarlos, monitorear el comportamiento de los peces, medir la temperatura del agua y rellenar el acuario con agua. Todas las mediciones y observaciones fueron documentadas en un diario, que también sirvió para transferir información entre los tres grupos que trabajaron en el mismo sistema.

La secuencia de enseñanza (Tabla 22.3) tuvo lugar entre octubre de 2007 y enero de 2008. Se introdujeron varios temas en los conceptos básicos del sistema de lecciones (relación entre componentes del sistema, conceptos de retroalimentación y autorregulación), y conocimiento básico sobre acuaponia. Todas las unidades didácticas se describen en detalle en Bollmann-Zuberbuehler et al. (2010) El efecto de la secuencia de enseñanza sobre las competencias de pensamiento sistémico se evaluó al principio y al final de la secuencia (véase la sección 22.8.1.4) y se describió en detalle en Junge et al. (2014).

Ejemplo 22.4 Laboratorio EXPLOR: Día de la Ciencia en la Universidad de Zurich

de Ciencias Aplicadas para Estudiantes de Escuelas Secundarias, Suiza Veinte estudiantes de 18 a 19 años (11º año escolar, con especialización en Biología y Química) de la Escuela Cantonal de Menzingen visitan la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich (ZHAW) todos los años para un Taller de Acuaponia. El programa varía ligeramente de un año a otro, dependiendo de los experimentos actuales en el Laboratorio de acuaponía.

Programa:
- Saludos: Introducción al taller.
- Video de E-learning: Introducción a la acuaponía.
- Recorrido por la instalación de demostración de acuaponia; discusión del comportamiento apropiado en la instalación experimental.
- Métodos de medición de aprendizaje. División en 4 equipos.
- Recorrido por el laboratorio de acuaponia, que consta de 4 sistemas (tres acuaponicos y uno hidropónico). Cada equipo reunió datos de un sistema.

Asignación:
1. Medición de la calidad del agua en diferentes partes de los sistemas hidropónicos e hidropónicos (tanque de peces, biofiltro y sumidero) utilizando el medidor manual de electrodos múltiples (Hach Lange GmbH, Rheineck, CH) para medir la temperatura (T), pH, contenido de oxígeno y conductividad eléctrica (CE).
2. Usando el Dualex-Clip para medir el índice de equilibrio de nitrógeno (NBI), el contenido de clorofila (CHL), el contenido de flavonoides (FLV) y el contenido de antocianinas (ANTH) de las hojas de tres lechugas.
3. Completar los datos en la hoja de cálculo Excel preparada previamente.
4. De vuelta al aula: Calcular si hay diferencias entre las plantas de lechuga que crecen en sistemas hidropónicos e hidropónicos, comparación de datos y debates.

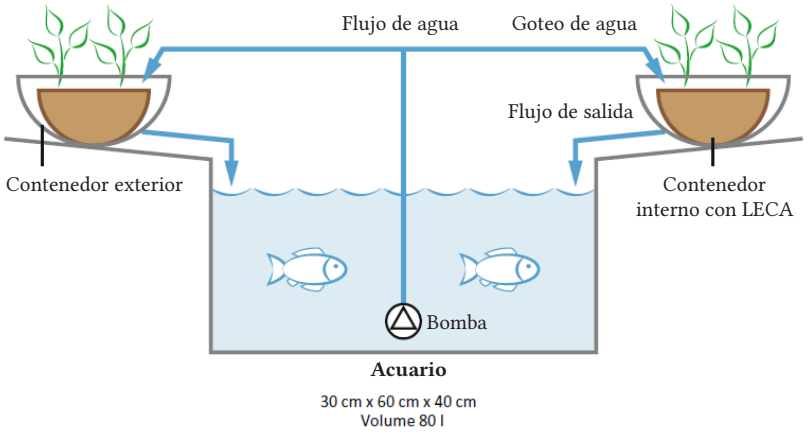


Fig. 22.4 Acuaponía simple en el aula. (Adaptado después de Bamert y Albin 2005). Las plantas crecen en contenedores llenos de agregado de arcilla expandida ligera (LECA) que generalmente se usa en hidrocultivos.

Tabla 22.3 Secuencia de unidades de enseñanza en tres clases de estudiantes de séptimo grado durante un curso de un semestre en una escuela primaria en Suiza.

Unidades de enseñanza	Numero de clases	Métodos	Contenido
TU1	1	Encuesta de existente knowledge	Prueba previa a la actividad
TU2	4	Conferencia del profesor, investigación y presentaciones de estudiantes	Sistema básico
TU3	2	Conferencia del maestro, asignación de estudiantes	La herramienta "Círculo de conexión" permite a los estudiantes dibujar un diagrama de un sistema (adoptado de Quaden y Ticotsky 2004).
TU4	2	Descubrimiento de aprendizaje Presentación por estudiantes	Planificación de una acuaponía: subunidades, conexiones
TU5	2	Aprendizaje basado en problemas. (PBL)	Definir los principales indicadores del sistema: peces y plantas y sus interacciones.
TU6	3	Descubrimiento de aprendizaje	Monitoreo de la acuaponia
TU7	3	Presentacion por estudiantes	Dibujar un diagrama de las interconexiones en acuaponia
TU8	1	Encuesta de conocimiento	Prueba post-actividad
TU9	2	Fiesta Acuaponica	Cosecha, preparación de ensalada, comer.

22.5 ACUAPONÍA EN EDUCACIÓN Y FORMACIÓN PROFESIONAL

UNESCO-UIS / OECD / EUROSTAT (2017) define los programas de educación vocacional como *"diseñados para que los estudiantes adquieran los conocimientos, habilidades y competencias específicas de una ocupación, oficio o clase de ocupaciones u oficios en particular. La finalización exitosa de tales programas conduce a calificaciones profesionales relevantes para el mercado laboral, reconocidas como orientadas ocupacionalmente por las autoridades nacionales relevantes y / o el mercado laboral"* (UNESCO, 2017).

Con el fin de educar a los futuros acuicultores y técnicos en acuaponia, la capacitación debe incluir la operación profesional de acuaponia. Por lo tanto, el entorno de capacitación debe ser de última generación. Sin embargo, el entorno no tiene que ser grande: 30 m2 deberían ser suficientes (Podgrajsek et al. 2014, ejemplos 22.5 y 22.6). Dichos sistemas deben ser planificados y construidos por profesionales, ya que requieren un monitoreo y operación complejos.

Los estudiantes pueden participar en: (i) instalación (bajo orientación profesional); (ii) mantenimiento y operación general (incluyendo controles y limpieza diarios); (iii) operación del subsistema hidropónico (siembra,

cosecha, manejo integrado de plagas, control climático, ajuste de pH y niveles de nutrientes, etc.); (iv) operación del subsistema de acuicultura (alimentación de peces, determinaciones de peso de peces, ajuste de niveles de pH, etc.); (v) monitoreo de parámetros (calidad del agua, crecimiento y salud de los peces, crecimiento y calidad de las plantas); y (vi) operaciones de cosecha y poscosecha.

La Unión Europea invirtió en el desarrollo de la educación profesional a través del Programa Leonardo y, más recientemente, de ERASMUS +. Estos programas han financiado varios proyectos que incluyeron la implementación de acuaponia, incluido el Proyecto de transferencia de innovación Leonardo da Vinci (Programa de aprendizaje permanente) "Introducción a la acuaponía en EFP: herramientas, unidades de enseñanza y formación de docentes" (AQUA-VET) ". El proyecto preparó un plan de estudios para la educación profesional en acuaponia y los resultados están disponibles en www.zhaw.ch/iunr/aquavet. Las unidades de enseñanza se probaron en tres escuelas vocacionales en Italia, Suiza (Baumann 2014) y Eslovenia (Peroci 2016). Como parte de este proyecto, se construyó una unidad de acuaponia en la escuela vocacional Naklo del Centro Biotécnico en Eslovenia (Ejemplo 22.5).

Otro ejemplo es la unidad de acuaponia construida en la Provinciaal Technisch Insituut, una escuela de horticultura en Bélgica (Ejemplo 22.6).

Ejemplo 22.5 acuaponía en el Centro Biotécnico Naklo en Eslovenia
La acuaponia (Fig. 22.5a) se construyó en 2013 en el marco del proyecto Leonardo da Vinci "AQUA-VET" (Krivograd Klemenčič et al. 2013; Podgrajšek et al. 2014). Un módulo de curso de acuaponia fue desarrollado y enseñado a una clase de 30 estudiantes en el segundo año de su programa de Técnico Ambiental (Peroci 2016). El objetivo era investigar la posibilidad de incluir la acuaponia en el programa regular de educación vocacional secundaria en ciencias biotecnológicas, y en el plan de estudios estándar de habilidades profesionales necesarias para la calificación vocacional nacional de un "agricultor acuaponico". El curso constaba de seis lecciones (45 minutos cada una), de las cuales cuatro estaban dedicadas a la teoría de la acuaponía y dos a la capacitación práctica (Fig. 22.5b).

Lección 1 acuaponía: definición, introducción a la acuicultura e hidroponía, operación de una acuaponía.
Lección 2 Microorganismos: (i) el papel de los microorganismos: microorganismos útiles, el ciclo del nitrógeno y la importancia de los biofiltros en acuaponía; (ii) monitoreo de parámetros seleccionados, plan de monitoreo, protocolos y evaluación de los resultados.
Lección 3 Peces: estructura y funcionamiento del cuerpo de peces, selección de

especies de peces adecuadas para el cultivo en acuaponía, métodos de alimentación, enfermedades y lesiones de peces, y cría de peces.

Lección 4 Anatomía de la planta, selección de especies de plantas adecuadas para el cultivo en acuaponía, el papel de las plantas en acuaponía, identificación de enfermedades de las plantas y estrategias apropiadas de protección de las plantas.

Trabajo práctico (2 h) Los estudiantes trabajaron en dos grupos (observación, monitoreo, discusión, presentación) en la unidad de acuaponía en el Centro Biotécnico Naklo.

Las actividades de aprendizaje cubrieron varios niveles de habilidades, proporcionando lecciones bien diseñadas para las partes teóricas y prácticas. La progresión del aprendizaje se evaluó mediante varios cuestionarios (véase la sección 22.7.2).

Ejemplo 22.6 Acuaponia en Provinciaal Technisch Insituut, una escuela de horticultura en Bélgica

El Provincial Technisch Institut (PTI) en Kortrijk fue pionero en acuaponia en el aula en Bélgica a nivel de educación vocacional. El proyecto comenzó en 2008, cuando se introdujeron los tanques de peces en el invernadero que se utiliza para enseñar cursos prácticos a los estudiantes en agronomía y biotecnología (Fig. 22.6).

Inicialmente, la acuaponía se usó ad hoc en una serie de clases, por ejemplo, para enseñar biología de plantas y peces, química del agua, etc., pero solo después de un par de años la acuaponía se incorporó estructuralmente en un número por supuesto módulos. El desafío principal era encontrar el tiempo para traducir los objetivos de logro del gobierno en los módulos del curso de acuaponía. Este desafío ilustra la importancia de proporcionar un apoyo suficiente tanto para satisfacer las necesidades del plan de estudios como para abordar los obstáculos operativos y organizativos para las nuevas iniciativas de acuaponía en las escuelas.

Desde el principio, la acuaponía en PTI también actuó como piloto en proyectos de investigación aplicada con universidades (Ghent University, KU Leuven, ULG Gembloux), colegios universitarios (HoWest, HoGent, Odisee), institutos de investigación (Inagro, PCG) y privados. empresas (aqua4C, Agriton, Lambers-Seeghers, Vanraes automation). En efecto, la escuela se ha convertido en un socio valioso en múltiples proyectos nacionales e internacionales. Los alumnos de PTI participan no solo en el trabajo operativo diario sino también en la recopilación de datos para los experimentos coordinados por los investigadores académicos. Esta colaboración crea una oportunidad única para que los estudiantes se familiaricen con las actividades de los colegios universitarios y universidades, y puede estimular a los estudiantes a avanzar hacia la educación superior.

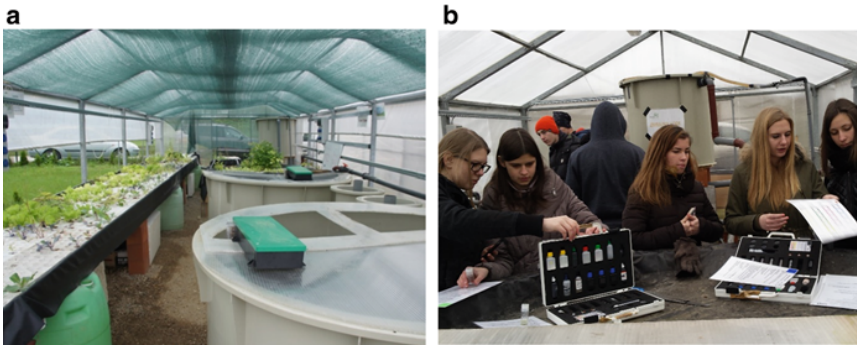


Fig. 22.5 (a) Acuaponía en el Centro Biotecnológico Naklo en Eslovenia. (Foto: Jarni 2014). (b) Trabajo práctico en la unidad de acuaponía del Centro Biotécnico Naklo. (Foto Peroci 2016).

Fig. 22.6 Vista interior del invernadero de Provincial Technisch Insituut (PTI). Peceras (que contienen *Scortum barcoo*) se encuentran debajo del riego por goteo quebradas de tomate. En el medio del invernadero, se cultiva Cangrejo de Australia (*Cherax quadricarinatus*).

22.6 ACUAPONÍA EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR.

Los programas de educación superior deben adaptarse para cumplir con las expectativas del nuevo milenio, como la seguridad y soberanía alimentaria a largo plazo, la agricultura sostenible / producción de alimentos, el desarrollo rural, el hambre cero y la agricultura urbana. Estos importantes impulsores significan que las instituciones de educación superior

involucradas en las áreas de producción de alimentos pueden desempeñar un papel clave en la enseñanza de la acuaponía a través del desarrollo de capacidades y la creación y el intercambio de conocimientos. Además, está claro que el interés por enseñar y aprender acuaponia está aumentando (Junge et al. 2017).

En las universidades y colegios, la acuaponía generalmente se enseña como parte de los cursos de agricultura, horticultura o acuicultura y el contexto para el desarrollo del contenido del curso en la educación superior es específico para la dinámica interna y externa de cada institución. El principal desafío en el diseño de cursos de educación superior es la naturaleza interdisciplinaria de la acuaponia, ya que el conocimiento previo de la acuicultura y la horticultura es esencial. Si bien algunos estudios investigaron el uso de la acuaponia en la educación (Hart et al. 2013; Hart et al. 2014; Junge et al. 2014; Genello et al. 2015) y hay varios cursos en línea disponibles, un resumen del curso para La acuaponía en el nivel terciario en una corriente principal aún no existe, o al menos no se ha publicado.

Para los cursos de acuaponía de nivel terciario que se implementarán en la UE, el Proceso de Bolonia, que subraya la necesidad de una implementación significativa de los resultados del aprendizaje para consolidar el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), necesita ser seguido. Los resultados de aprendizaje son (i) declaraciones que especifican lo que un alumno sabrá o podrá hacer como resultado de una actividad de aprendizaje; (ii) declaraciones de lo que se espera que un alumno sepa, comprenda y / o pueda demostrar después de completar un proceso de aprendizaje; y (iii) generalmente se expresan como conocimiento, habilidades o actitudes (Kennedy 2008).

La Tabla 22.4 y el Ejemplo 22.7 presentan dos marcos conceptuales para la enseñanza de acuaponia. Se considera que ambos cursos valen 5 créditos ECTS (Sistema Europeo de Transferencia de Créditos), que corresponden a una carga de estudio de aproximadamente 150 h.

El uso del aprendizaje combinado para enseñar un currículo multidisciplinario único permitirá a los estudiantes de educación superior de una variedad de disciplinas académicas diferentes unirse físicamente y virtualmente para adquirir habilidades profesionales y transversales deseadas por los empleadores. Obtendrán habilidades avanzadas en la economía circular, la ingeniería ambiental y ecológica, y los sistemas de producción de ciclo cerrado (energía, agua, desechos), utilizando la acuaponia como ejemplo de buenas prácticas. Al final del proyecto en 2020, la guía del módulo y el plan de estudios estarán disponibles en el sitio web del proyecto (https://aquateach.wordpress.com/),

junto con una caja de herramientas de técnicas didácticas innovadoras apropiadas para enseñar acuaponia, un libro de texto y materiales didácticos, y una guía de mejores prácticas para la enseñanza de acuaponia. El plan de estudios de acuaponia y el plan de estudios complementarios de habilidades empresariales serán de libre acceso como un curso interactivo de acuaponía en línea.

Ejemplo 22.7 Proyecto Aqu @ teach, una Asociación Estratégica Erasmus + en Educación Superior (2017–2020)

La tarea central del proyecto es diseñar un plan de estudios de acuaponia (150 h de carga de trabajo del estudiante correspondiente a 5 créditos ECTS y un módulo complementario de habilidades empresariales (60 h), que se impartirá mediante aprendizaje combinado. Aprendizaje combinado (que combina medios digitales e Internet con formatos de aula que requieren la presencia física de maestros y estudiantes) ofrece vías alternativas para obtener conocimiento e involucrar a los estudiantes en la creación de contenido, lo que también mejora la preparación de los estudiantes para sus lecciones y fomenta su motivación. que las interacciones con el profesor pueden dedicarse al aprendizaje en profundidad y al desarrollo de habilidades prácticas. Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) son particularmente valiosas para enseñar acuaponía ya que permiten la presentación efectiva de sistemas y procesos, como el modelado de simulación (gráfico, numérico) de los parámetros (peso de peces / alimentación de entrada / área de superficie de lechos acuaponicos, etc.). Tomar el curso Aqu@teach utilizará portafolios electrónicos (programa Mahara) para documentar su progreso en el aprendizaje. El plan de estudios incluirá los siguientes módulos:

	Modulo	No. de Horas
1	Tecnología acuapónica	8
2	Acuacultura	12
3	Anatomía, salud y bienestar de los peces.	8
4	Alimentación de peces y crecimiento	10
5	Balance hídrico de nutrientes	5
6	Hidropónicos	13
7	Variedades de Plantas	10
10	Manejo integrado de plagas	8
9	Monitoreo de Parámetros	8
10	Seguridad alimenticia	12
11	Métodos de Investigación científica	10
12	Diseña y construye	16
13	Agricultura Urbana	10
14	Acuaponia Verical	8
15	Aspectos sociales de la acuaponia.	12

Tabla 22.4 Resumen del curso de acuaponía propuesto a nivel universitario (5 ECTS). El marco flexible contiene dos temas clave (hidroponía y acuicultura) y se agrupa en seis áreas de aprendizaje.

Titulo del curso:	**Acuapónicos**	
Descripcion del curso:	La acuaponía es un método de producción de alimentos que combina la hidroponía y la acuicultura para formar un sistema que recircula el agua y los nutrientes y produce plantas terrestres y acuáticas, incluidas algas y organismos acuáticos, al tiempo que minimiza la descarga de desechos. Este curso permite a los estudiantes usar las habilidades técnicas adquiridas para configurar un sistema integrado. Los equipa con el conocimiento necesario para poder emprender y ser conscientes de los aspectos críticos de la acuaponía.	
Nivel Básico:	BSc or MSc	
Nombre de la unidad	1. Acuaponicos	2. Operación acuapónica
Propósito unidad	Comprender el diseño y la gestión del sistema, los componentes y las técnicas de construcción.	Para comprender las características del agua, los ciclos microbiológicos y bioquímicos (por ejemplo, el ciclo del nitrógeno) dentro de una acuaponía, y las interacciones entre el agua y las plantas.
Conocimientos y habilidades previas recomendadas:	Conocimientos básicos de biología y agricultura (horticultura y acuicultura).	Conocimientos básicos de calidad del agua, organismos acuáticos, microbiología acuática.
Los resultados del aprendizaje	Los estudiantes deben ser capaces de	Los estudiantes deben ser capaces de
	explicar las características de un Sistema acuaponico	explicar los parámetros de calidad del agua;
	explicar los tipos de acuaponia;	explicar ciclos bioquímicos y microbianos transformations;
	explicar las técnicas de construcción; y	identificar criterios para la producción de peces y plantas;
	Describir la operación de los componentes	calcular todos los parámetros relevantes de crecimiento de peces; y plantas
		Explicar la cosecha y el procesamiento.
Conocimientos y / o habilidades:	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben poder diseñar un Sistema acuaponico.	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben poder
		describir los criterios de calidad del agua;
		analizar la calidad principal del agua; parámetros (oxígeno disuelto, pH, amoníaco, nitrito, nitrato);
		explicar los efectos de la temperatura del agua en peces y plantas;
		explicar las condiciones óptimas del agua para los peces;
		explicar la interacción entre el agua y las plantas;
		explicar estrategias de alimentación;
		calcular las raciones de alimentación requeridas

Continuación tabla 22.4 Resumen del curso de acuaponía propuesto a nivel universitario...

Requisitos de evidencia:	Los estudiantes deberán evaluar los diferentes tipos de acuaponia en términos de sus ventajas y desventajas relativas.	Se requerirá que los estudiantes Aplique un cálculo para la densidad de población y el régimen de alimentación utilizando el tamaño del pescado, el volumen de agua y los parámetros de calidad del agua.
Nombre de la Unidad	3. Producción de plantas	4. Producción de organismos acuáticos
Propositos de la unidad	Demostrar la capacidad de cuidar las plantas para mantener un crecimiento y una salud óptimos al considerar la poda, la siembra y el riego.	Comprender el crecimiento de organismos acuáticos como peces y crustáceos y sus requerimientos en un sistema acuaponico.
	Describir las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas.	
Conocimientos y habilidades previas recomendadas:	Conocimientos básicos de horticultura. Informática / alfabetización técnica.	Fisiología básica de organismos acuáticos, conceptos nutricionales y reproducción de peces y crustáceos en acuicultura.
Los resultados del aprendizaje	Los estudiantes deben ser capaces de	Los estudiantes deben ser capaces de
	describe cómo plantar una planta;	Explicar el crecimiento de organismos acuáticos, principios nutricionales en acuicultura, producción de peces, manejo de reproductores, cría / alevines. Inversión sexual; y
	Describir los requisitos de crecimiento de las plantas	explicar los principios de la acuicultura.
	identificar las plantas más adecuadas para la acuaponía;	
	describir técnicas de producción de semillas;	
	Describir las técnicas de transplante	
	asignar plantas adecuadas para diferentes estaciones del año;	
	definir la presión del agua; y	
	tasa de flujo y cómo calcularlos;	
	explicar cómo controlar las plagas;	
	explicar las técnicas de cosecha.	
Conocimientos y / o habilidades:	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben poder explicar	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben poder explicar
	production de plántulas	describir el funcionamiento de RAS
	crecimiento de la planta	Identificar las especies de peces / crustáceos adecuados para acuaponia
	control de enfermedades e insectos	Identificar los requisitos de crecimiento de diferentes organismos acuáticos.
	harvesting	

Continuación tabla 22.4 Resumen del curso de acuaponía propuesto a nivel universitario...

Requisitos de evidencia:	Se requerirá que los estudiantes	Se requerirá que los estudiantes
	Comparar diferentes plantas con respecto a su idoneidad para acuaponia	Describir el papel de la acuicultura dentro de una acuaponia.
Nombre de la unidad	5. Economía de la acuaponia	6. Estrategia de gestión de riesgos
Propósito de la unidad	Comprender los procesos necesarios para establecer un sistema económicamente viable.	Comprender los elementos de gestión de riesgos, incluida la identificación, análisis, respuestas y control de riesgos.
	Conocimientos matemáticos y estadísticos básicos	Conocimiento matemático básico
Los resultados del aprendizaje	Los estudiantes deben ser capaces de	Los estudiantes deben ser capaces de
	explicar la rentabilidad y la sostenibilidad;	identificar los riesgos potenciales;
	estimar la depreciación, gastos de capital, gastos operativos, ventas, utilidades y estado de pérdidas;	desarrollar un plan de gestión de riesgos;
	explicar los cálculos utilizados para determinar los flujos de efectivo;	analizar riesgos cuantitativos y cualitativos; y
	discutir el saldo del presupuesto; y	Monitorear y controlar los riesgos.
	califique los indicadores financieros.	
Conocimientos y / o habilidades	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben poder crear un modelo de viabilidad económica.	Al finalizar la unidad, los estudiantes deben saber cómo crear una matriz de probabilidad de impacto relacionada con los riesgos.
Requisitos de evidencia:	Se requerirá que los estudiantes	Se requerirá que los estudiantes
	Cree un modelo de viabilidad utilizando diferentes indicadores financieros basados en un estudio de	Crear una matriz de riesgo de impacto de probabilidad basada en un estudio de caso
Actividades de evaluación	Presentación oral / por computadora, informe escrito, pruebas en el aula.	

22.7 ¿ACUAPONÍA CUMPLE SU PROMESA EN LA ENSEÑANZA? EVALUACIONES DE UNIDADES DOCENTES POR DOCENTES

22.7.1 Entrevistas de maestros en Jugar-Con-Agua

Las unidades de enseñanza de acuaponía se evaluaron en el proyecto del 6PM "Jugar con agua" en siete ocasiones distintas en tres países (Suecia, Noruega, Suiza). Esto involucró a seis escuelas (1 escuela en Noruega, 1 en Suecia y 4 en Suiza) donde la edad de los estudiantes oscilaba entre 7 y 14 años. Se les pidió a seis maestros que llevaran un diario, que luego utilizaron para responder un cuestionario en línea complementado con entrevistas telefónicas, que se resumen en la Tabla 22.5. Los comentarios de los maestros sobre su experiencia con la acuaponía indicaron que algunos

Tabla 22.5 Respuestas resumidas de los seis maestros entrevistados con respecto a las ventajas y desventajas de usar la acuaponía como herramienta de enseñanza

¿Cuáles son las principales ventajas?	Numero de menciones	Cuales son las principales desventajas?	Numero de menciones
Apto para aprender pensamiento sistémico	3	Ninguno.	2
Facilita el trabajo en equipo.	2	Alto tiempo requerido.	2
movilización de estudiantes	2	Altos requisitos de conocimiento.	2
Proporciona diversidad en la enseñanza.	2	Conceptos difíciles y idioma.	1
Motivando para los estudiantes	1	Sensible a las plagas.	1
Motivando para los maestros	1	Los estudiantes no siempre prestaban atención.	1
Posible transferencia entre diferentes temas	1		
Versátil: varios objetivos educativos posibles	1		

problemas eran demasiado complejos para las escuelas primarias. Los experimentos de "Jugar con agua", como los disponibles en el sitio web del proyecto (www.zhaw.ch/iunr/play-with- water /) pueden ser más apropiados para su uso en la educación secundaria. El aprendizaje los materiales contienen descripciones de procesos complejos e interacciones ecológicas que requieren un conocimiento más profundo de las ciencias naturales como la química o la biología de lo que se puede esperar en la escuela primaria. Si el material debe ser utilizado por los maestros, debe proporcionar la información en un formato listo para el aula. Las explicaciones de los procesos químicos y biológicos, como la nitrificación, deberían simplificarse enormemente.

22.7.2 Estudio integral del potencial para incluir acuaponia en la educación profesional secundaria en Eslovenia

Peroci (2016) investigó una serie de aspectos relacionados con el potencial para incluir la acuaponía en el proceso educativo de la educación profesional secundaria en Eslovenia (Fig. 22.7). Esto incluye:

(i) Análisis de catálogos de educación secundaria profesional en campos biotécnicos para evaluar la compatibilidad de estos programas educativos con los objetivos de aprendizaje relacionados con la acuaponía.
(ii) Diseño de un breve curso educativo de acuaponía que incluye la definición de resultados de aprendizaje (conocimiento y habilidades). El material didáctico para el aprendizaje experimental fue probado y evaluado por una clase de estudiantes en el Centro Biotecnológico

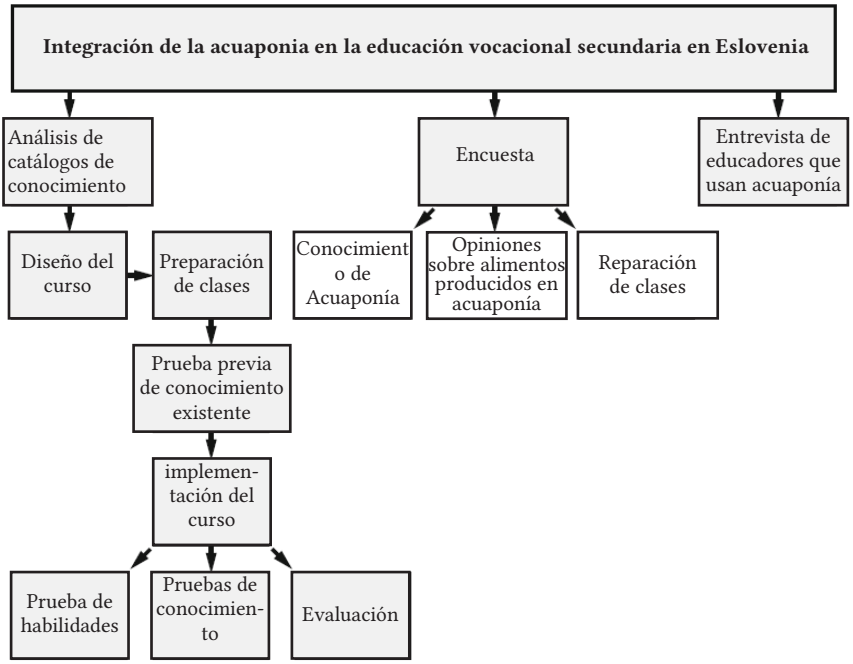


Fig. 22.7 Estructura general del estudio de Peroci (2016) acerca del potencial de incluir la enseñanza de acuaponía como proceso en la educación secundaria vocacional en Eslovenia.

Naklo (Precedente 5, Sección 22.8.2).

(iii) Encuesta sobre el conocimiento y las actitudes hacia la acuaponía en las escuelas de biotecnología en Eslovenia por estudiantes que asisten a los programas para administradores de tierras, técnicos hortícolas, técnicos en agricultura y gestión, y técnicos ambientales, para evaluar las actitudes de los estudiantes. hacia este tipo de producción de alimentos (véase la Sección 22.8.2.) La lista de posibles candidatos para participar en la encuesta fue preparada en base a una revisión de las escuelas secundarias por el Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte de la República de Eslovenia.

(iv) Entrevistas semiestructuradas con docentes en escuelas relevantes, examinando la implementación de la acuaponía como herramienta de aprendizaje en Eslovenia (Sección 22.7.2.1).

22.7.2.1 Entrevista con profesores y formadores que utilizan la acuaponía en el proceso educativo en Eslovenia

Para investigar el uso de la acuaponía como herramienta de aprendizaje en Eslovenia, Peroci (2016) realizaron entrevistas semiestructuradas (45–60 min) con cinco maestros.

El análisis de las entrevistas reveló las siguientes razones para usar acuaponia: (i) posibilidad de aprendizaje experimental, (ii) instalación flexible que se puede adaptar a la meta educativa, (iii) una buena forma de enseñar sobre producción de alimentos, y para enseñar STEM asignaturas. Estos fueron muy similares a las razones reveladas por las entrevistas en América del Norte realizadas por Hart et al. (2013) Sin embargo, en contraste, en las entrevistas realizadas en Eslovenia, faltaron dos razones para usar acuaponía: diversión y desarrollo de responsabilidad y compasión por los organismos vivos.

Basado en el análisis de las entrevistas relacionadas con las tres unidades de acuaponía utilizadas para la educación en Eslovenia, la implementación futura de la acuaponía como herramienta de aprendizaje debe centrarse en los siguientes pasos:

1. Desarrollar un conjunto de resultados de aprendizaje que se puedan lograr utilizando una unidad de acuaponía
2. Diseñar la unidad de enseñanza de acuaponía, que facilita los resultados de aprendizaje y las competencias que los estudiantes deben obtener para convertirse en un *"agricultor acuapónico"*.
3. Establecer un vínculo entre maestros y formadores (jardines de infancia, escuelas primarias, escuelas secundarias, universidades), comunidades locales, empresas y personas involucradas en acuaponía.
4. Desarrollar pautas para integrar la acuaponía en el proceso de aprendizaje.
5. Realización de talleres para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de una acuaponía.

22.8 ¿ACUAPONÍA CUMPLE SU PROMESA EN LA ENSEÑANZA? EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE LOS ESTUDIANTES A LA ACUAPONÍA

22.8.1 Proyecto del 6PM de la UE "Recursos de aguas residuales"

El objetivo del proyecto Recursos de aguas residuales era reunir, desarrollar y evaluar material de enseñanza y demostración sobre investigación ecotecnológica y métodos para alumnos de entre 10 y 13 años. Las unidades de enseñanza fueron evaluadas para mejorar los métodos y el contenido y maximizar los resultados del aprendizaje. Basado en discusiones con profesionales de la educación, la evaluación se basó en un enfoque simple utilizando cuestionarios y entrevistas semiestructuradas. Los maestros evaluaron las unidades respondiendo el cuestionario en línea (ver Sección 22.7.1). Las unidades de acuaponía fueron evaluadas en Suecia (en el Centro de Ciencias Technichus, y en Älandsbro skola en Härnösand), y en Suiza.

22.8.1.1 Centro de ciencias Technichus, Suecia

Entre 2006 y 2008, se instaló una unidad de acuaponía en Technichus, un centro de ciencias en Härnösand, Suecia (www.technichus.se). El cuestionario se colocó al lado del sistema para que los estudiantes visitantes pudieran responder las preguntas en cualquier momento. Consistió en 8 preguntas (Fig. 22.8).

Las respuestas mostraron que los estudiantes entendieron cómo se recirculó el agua en el sistema. Entendieron menos bien cómo se transportaban los nutrientes dentro del sistema y el contenido de los nutrientes y, curiosamente, uno de cada cuatro estudiantes no sabía que las plantas que crecían en la unidad de acuaponía eran comestibles.

22.8.1.2 Älandsbro skola, Suecia

El cuestionario utilizado en Älandsbro skola fue explicado por primera vez por el maestro para asegurar que los estudiantes entendieran las preguntas. Las preguntas fueron respondidas antes de que el proyecto comenzara y al final del proyecto.

En promedio, hubo un 28% más de respuestas correctas a las preguntas generales sobre los requerimientos de nutrientes de las plantas y los peces después de la unidad de enseñanza. Como era de esperar, y similar a los resultados de Bamert y Albin (2005), el aumento en el conocimiento fue evidente.

Las conclusiones de la investigación fueron que (i) trabajar con acuaponia tiene un gran potencial para ayudar a los alumnos a alcanzar objetivos de aprendizaje relevantes en el plan de estudios sueco para biología y ciencias naturales; (ii) los profesores pensaron que el trabajo brindaba oportunidades naturales para hablar sobre el ciclismo de la materia y que atraía el interés de los alumnos; (iii) los cuestionarios mostraron que un gran número de alumnos había cambiado su opinión sobre las necesidades de

	I agree (%)	I mostly agree (%)	I mostly disagree (%)	I disagree (%)
I understand that the plants in this aquarium get the nutrients from the fish.	33	21	21	25
I know the content of the nutrient, which comes from the fish.	29	14	24	33
I know that the water recirculates from the aquarium to the plants and back to the aquarium.	43	14	33	10
I know that the plants need light in order to grow.	59	9	5	27
I understand what a circulating system is.	61	11	6	22
I think it is good that you can cultivate plants together with fish.	48	19	19	14
I know that you can eat the plants and fruits which grow above the fish in the aquarium.	50	20	5	25
I know that this aquarium with fish and plants are a recirculating system.	43	10	33	14

Fig. 22.8 Cuestionario y frecuencia de respuestas de los 24 estudiantes (de 8 a 17 años) visitando la exposición en Technichus, Suecia.

peces y plantas antes y después de trabajar con el sistema; y (iv) las entrevistas con los alumnos mayores mostraron que habían adquirido buenos conocimientos sobre el sistema.

Aún más importante, todas las personas involucradas (maestros y estudiantes) encontraron que la acuaponía proporcionó los medios para expandir el horizonte de la disciplina, de una manera refrescante y efectiva.

22.8.1.3 Comparación del éxito de la acuaponía en clases de ambientes urbanos y rurales en Suiza.
Bamert (2007) comparó los efectos de la enseñanza con acuaponía en el aula con estudiantes de 11 a 13 años en dos entornos diferentes en Suiza. La escuela en Donat, Cantón de los Grisones, está situada en la región alpina rural, donde los estudiantes viven principalmente en granjas cercanas. Muchas de estas granjas son orgánicas, por lo que estos estudiantes conocían ciertos conceptos sobre los ciclos en la naturaleza de su vida cotidiana. Había 16 estudiantes, de edades comprendidas entre 11 y 13 años, en la clase conjunta de quinto y sexto grado. Su lengua materna es el romano romántico, pero las clases de acuaponía se impartieron en alemán. La escuela en Waedenswil, por otro lado, está situada en el área metropolitana de Zürich. Los estudiantes crecieron principalmente en un entorno urbano y tenían menos experiencia de la naturaleza en comparación con los estudiantes de Donat.

Debido a que los estudiantes de Donat declararon que la parte teórica era bastante difícil, la nitrificación no se explicó en Waedenswil (Ejemplo 22.2). Además, uno debe considerar que la unidad de enseñanza se extendió 11 semanas en Donat, mientras se realizaba como un taller de 2 días en Wädenswil.

Las respuestas a las preguntas sobre lo que más les gustó / no les gustó de las lecciones de acuaponía se presentan en la figura 22.9. Mientras que los estudiantes rurales estaban más fascinados por el sistema en sí, los estudiantes urbanos estaban mayormente fascinados por los peces. En general, los peces fueron el mayor motivador en ambas clases. Atrapar a los peces, transportarlos, alimentarlos y simplemente observarlos eran actividades muy populares. La sed de conocimiento sobre peces implicaba principalmente preguntas sobre reproducción, crecimiento, etc.

22.8.1.4 Promoción de sistemas de pensamiento con acuaponía en Suiza
El efecto de la secuencia de enseñanza descrita en el Ejemplo 22.3 sobre las competencias de pensamiento sistémico se evaluó al principio y al final de

Donat (N=16)	everything	nothing	the system	fish	survey	lecture notes	developing countries	puzzles	theory	final party/game
exciting	31	0	38	13	6	6	13	19	6	13
boring	0	50	0	6	13	19	0	0	0	0
difficult	0	13	0	0	19	0	0	0	50	0
fascinating	0	0	94	6	0	0	0	0	0	0
interesting	0	0	13	50	0	0	0	0	6	0

Wädenswil (N=20)	everything	nothing	the system	fish	survey	lecture notes	developing countries	puzzles	theory (simplified)	final party/game
exciting	30	0	5	55	0	0	0	5	0	5
boring	0	40	0	0	15	10	0	0	5	0
difficult	0	40	0	0	15	0	0	0	20	0
fascinating	0	15	30	20	0	0	10	0	0	0
interesting	0	0	15	40	0	0	10	0	10	0

Fig. 22.9 Respuestas de estudiantes de dos entornos diferentes (Donat-rural y Waedenswil-urban) sobre lo que más les gustó / disgustó en las lecciones de acuaponía.

la enseñanza. La capacidad de los estudiantes para pensar de manera sistémica en lugar de la sucesión lineal mejoró significativamente en la prueba posterior en comparación con la prueba previa.

El pensamiento sistémico es una de las competencias clave en el mundo complejo (Nagel y Wilhelm-Hamiti 2008), y es necesario para obtener una visión general de los sistemas subyacentes del mundo real, porque la mayoría de los problemas son complejos y requieren un enfoque sistémico para Desarrollar una solución viable.

El pensamiento sistémico incluye cuatro dimensiones centrales (Ossimitz 1996; Ossimitz 2000): (i) pensar en modelos; (ii) pensamiento interconectado; (iii) pensamiento dinámico (pensar en procesos dinámicos, tales como retrasos, bucles de retroalimentación, oscilaciones); y (iv) manipulación de sistemas, lo que implica la capacidad de gestión práctica del sistema y control del sistema. La acuaponía en el aula se refiere principalmente al pensamiento interconectado y al pensamiento en modelos.

El pensamiento interconectado implica la identificación y evaluación de los efectos directos e indirectos, particularmente con respecto a la identificación de los circuitos de retroalimentación, la construcción y la comprensión de las redes y de la causa y el efecto.

El objetivo principal de la secuencia de enseñanza "Acuaponía en el aula" descrita en el Ejemplo 22.3 era permitir a los estudiantes adoptar herramientas que puedan ayudarlos a examinar problemas complejos. La hipótesis probada fue que la incorporación de la acuaponía en las unidades de enseñanza tendría una influencia positiva en las capacidades de pensamiento sistémico de los alumnos.

Todos los 68 estudiantes realizaron una prueba al principio y al final de la secuencia de enseñanza. Las pruebas previas y posteriores fueron idénticas y contenían un breve texto sobre la vida como granjero, que animó a los estudiantes a pensar sobre los agricultores y su comportamiento. Terminó con la pregunta: "¿Por qué el granjero puso estiércol en sus campos?" Los alumnos respondieron con un dibujo y / o una descripción de los motivos. Las respuestas de los estudiantes fueron evaluadas de acuerdo con el método descrito por Bollmann-Zuberbuehler et al. (2010), que permite utilizar un método cualitativo con resultados cuantitativos (para más detalles sobre esto, ver también Junge et al. 2014).

En general, la delimitación de los sistemas pasó de una descripción cualitativa a una descripción más esquemática y se volvió más compleja en la prueba posterior. Cuando se asignaron puntajes numéricos a cada nivel de dibujo (Tabla 22.6), un interesante surgió el patrón (Tabla 22.7). Mientras que ambos sexos alcanzaron el nivel medio de 7, lo que significa que la mayoría de los dibujos contenían al menos un ciclo y / o ciclo, al final de la secuencia de enseñanza, el cambio fue más marcado entre los niños, que comenzaron en un nivel inferior. Esto indicó que los niños se beneficiaron más de la experiencia práctica que las niñas.

En el siguiente paso, se calcularon el índice de Complejidad, el índice de Interconexión y el índice de Estructura (para más detalles, ver Junge et al. 2014). El índice de complejidad (en alemán: Komplexitätsindex, KI) muestra cuántos conceptos del sistema implementó el alumno:

Tabla 22.6 Identificación de la delineación de las representaciones del sistema

Delineacion	Descripcion	Puntaje
Sin dibujo	No hay representación en absoluto	1
Representación esquemática	Esquemas sin conexión lógica	2
Figura con etapas	Secuencia lógica con un mínimo de 3 etapas.	3
Otros tipos de representacion	Todas las demás representaciones, que no pudieron asignarse claramente	4
Gráfico lineal	Contiene al menos 1 cadena de eventos	5
Diagrama del efecto	Contiene además al menos 1 unión	6
Diagrama de Red	Contiene además al menos 1 ciclo de retroalimentación y / o ciclo	7

Tabla 22.7 Comparación de las puntuaciones medias de delineación entre la prueba previa y la posterior

	Prueba previa a la actividad (mediana)	Prueba post-actividad (mediana)	Cambio
Chicas	2.5	7	4.5
Chicos	2	7	5

KI = variables+flechas+cadena de eventos+unión+circuitos de retroalimentación (22:1)

El índice de interconexión (Vernetzungsindex, VI) muestra la frecuencia de las conexiones entre las variables:

VI = 2 x flechas=variables (22:2)

El índice de estructura (Strukturindex, SI) muestra cuántos conceptos de sistemas complejos implementó el alumno en la representación:

SI = cadenas de eventos+ uniones + junctions + bucles de retroalimentación = variables (22:3)

Los estudiantes encontraron más conceptos del sistema y sabían más sobre las variables del sistema en la prueba posterior que en la prueba previa, un hecho reflejado por todos los índices aplicados (Fig. 22.10).

Estos resultados parecen apoyar la hipótesis de que incorporar acuaponia en la enseñanza tiene una influencia positiva en las capacidades de pensamiento sistémico de los estudiantes, y que la "secuencia acuaponica en el aula" ideada fue exitosa en la capacitación de estudiantes en pensamiento sistémico.

22.8.2 Evaluación de la unidad de enseñanza de acuaponía en educación vocacional en Eslovenia.

22.8.2.1 Evaluación del curso de acuaponía, Centro Biotécnico Naklo, Eslovenia

La progresión del aprendizaje del curso corto de acuaponia dentro del estudio de Peroci (2016) (véase el precedente 5) se evaluó mediante cuestionarios: (i) pretest / posttest; (ii) prueba del nivel de habilidad adquirido en relación con la producción de alimentos en acuaponia; y (iii) evaluación docente.

Se evaluó la influencia de varios factores sobre la popularidad de las lecciones y el trabajo práctico. Los estudiantes mencionaron varios factores como cruciales para su interés en el curso de acuaponía. Los factores más relevantes fueron: maestros más relajados (80%); entretenimiento (76%); ubicación atractiva del trabajo práctico (72%); contacto con la naturaleza (68%); trabajo práctico activo (64%); y uso de nuevos métodos interesantes (56%). En general, los estudiantes calificaron las lecciones más interesantes como aquellas que fueron menos difíciles (por ejemplo, la

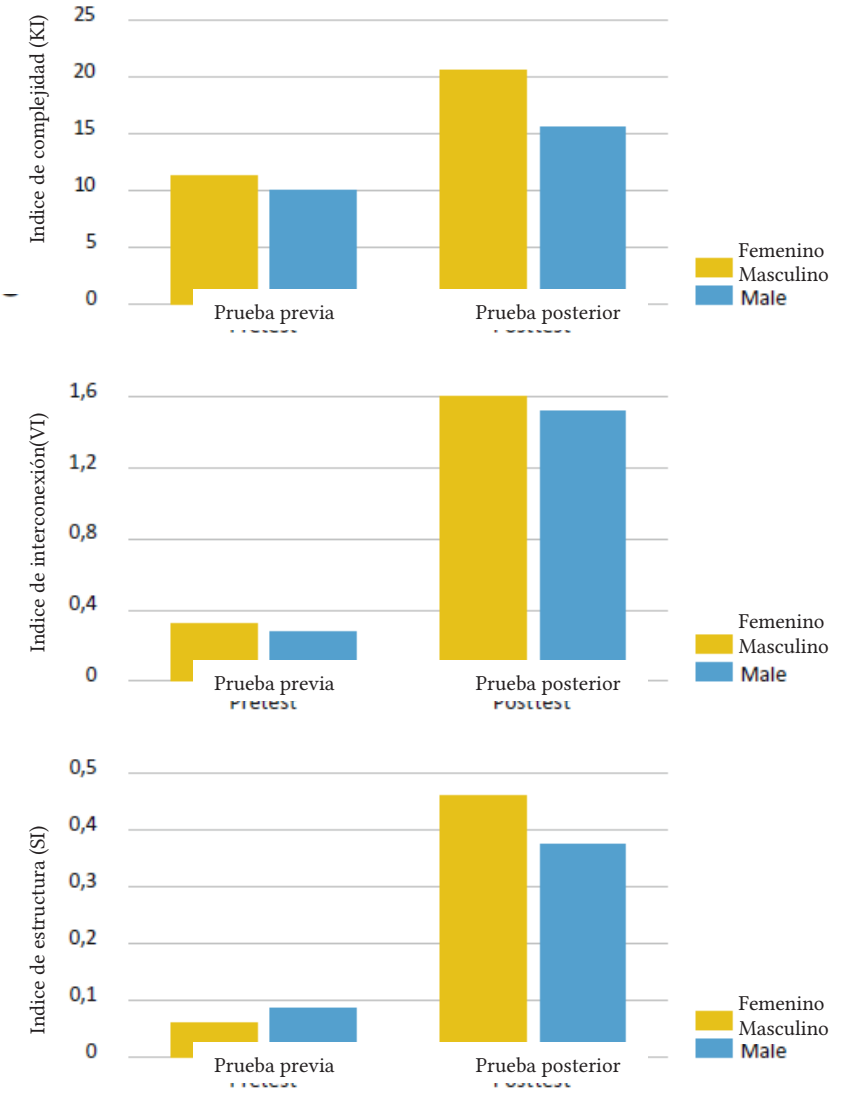


Fig. 22.10 Complejidad de las respuestas en las pruebas previas y posteriores a la actividad. Arriba: Índice de Complejidad (KI), centro: Índice de interconexión (VI), abajo: Índice de estructura (SI).

lección "Monitoreo de la calidad del agua y las bacterias" fue menos interesante y más difícil) (Fig. 22.11).

22.8.2.2 Encuesta de conocimiento y actitudes hacia la acuaponía

Peroci (2016) investigó el conocimiento, las actitudes hacia los alimentos producidos y el interés en el uso de acuaponía entre los estudiantes de 8 escuelas vocacionales secundarias en campos biotécnicos dentro de los programas educativos para el administrador de la tierra (1º a 3º año), técnico hortícola (1º a 4º año), técnico en agricultura y gestión (1º a 4º año)

y técnico medioambiental (1º a 4º año) durante 2015 y 2016. La encuesta incluyó un cuestionario de 15 minutos, con respuestas cerradas (sí o no). La encuesta mostró que el 42,9% de 1049 estudiantes ya habían escuchado sobre acuaponía. Lo habían aprendido en la escuela (379 estudiantes), de los medios de comunicación (79), de pares y conocidos (42), de anuncios (18), cuando visitan la acuaponía (12), en ferias agrícolas (2) y en acuarística (1). La mayoría de las respuestas positivas fueron de estudiantes del Centro Biotecnológico Naklo, donde se construyó la acuaponía en 2012 (Podgrajšek et al. 2014) y la acuaponía ya estaba integrada en el proceso de aprendizaje; El 28% de los encuestados no tenía ningún conocimiento sobre acuaponía y el 19,8% de los encuestados dijo que elegiría el curso de acuaponía sobre otros módulos, principalmente debido a su naturaleza interdisciplinaria y debido a su enfoque sostenible y creativo. Los estudiantes también esperaban que después de asistir a dicho curso, tendrían mejores posibilidades de encontrar un trabajo. A la mayoría de los estudiantes les gustó el trabajo práctico, y el 10,7% de los encuestados dijeron que les gustaría ser voluntarios manteniendo la acuaponía y que les gustaría establecer su propia acuaponía. El análisis sobre el interés de los estudiantes en producir alimentos utilizando acuaponía mostró que les gustó esta idea. Sin embargo, no estaban seguros de si comerían el pescado y las verduras producidas de esta manera, principalmente porque no tenían experiencia previa en el consumo de alimentos producidos en acuaponía. Con base en estos resultados, podemos suponer que la producción de alimentos en acuaponía será bien aceptada por los estudiantes de escuelas vocacionales secundarias en campos biotecnológicos. Esto es importante ya que estos estudiantes son la próxima generación de empresarios, agricultores y técnicos que no solo generarán, fabricarán y evolucionarán la acuaponía en el futuro, sino que también ayudarán a generar la confianza en la acuaponía entre las partes interesadas para que se convierta en parte de la producción de alimentos en Eslovenia en el futuro.

22.9 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

La acuaponía es un ejemplo perfecto de un sistema que puede acercar la naturaleza a un aula y puede usarse como punto de partida para una serie de actividades educativas tanto en la escuela primaria como en la secundaria. Un sistema modelo, junto con los métodos didácticos correspondientes, sirve para hacer que los procesos naturales sean más tangibles para los alumnos. Esto, a su vez, ayuda a desarrollar las competencias necesarias para hacer frente a la complejidad y los problemas del medio ambiente, y promueve un sentido de responsabilidad hacia la humanidad. La creación de la oportunidad de una experiencia práctica con la naturaleza y elementos naturales como el agua, los peces y las plantas también desarrolla la

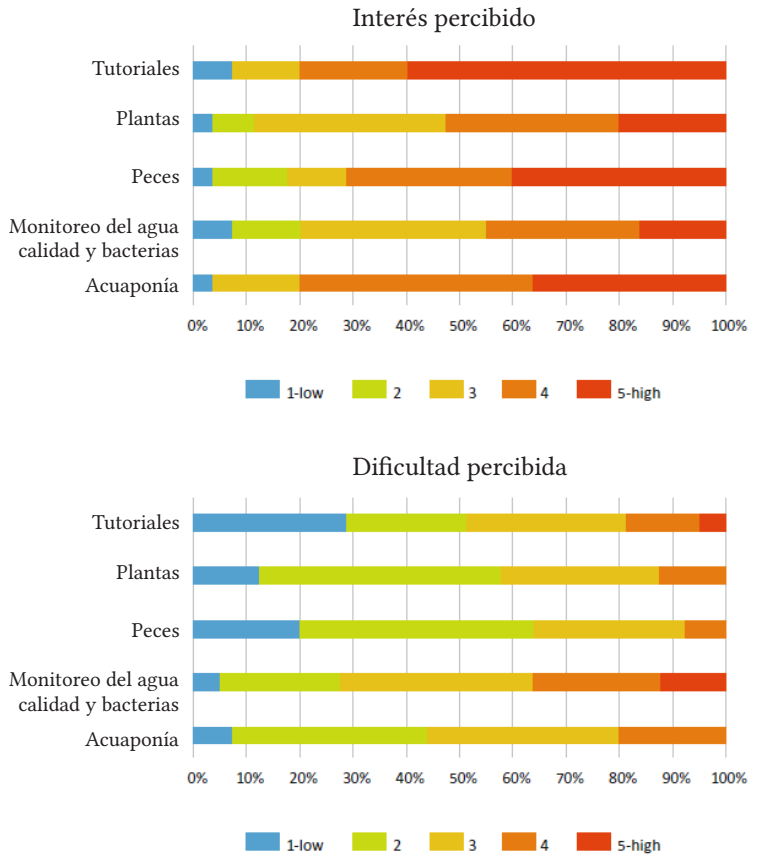


Fig. 22.11 Evaluación del interés percibido (arriba) y la dificultad (abajo) de las lecciones de acuaponía en la escuela vocacional en Naklo, Eslovenia. (Modificado después de Peroci 2016).

conciencia ambiental y una mayor comprensión del potencial de soluciones prácticas y la voluntad de actuar sobre este conocimiento.

En este capítulo, hemos presentado varios estudios de caso sobre el uso de acuaponía en diferentes niveles educativos, y también una serie de ejemplos que evalúan los beneficios de introducir la acuaponía en las escuelas.

Si bien para cada estudio por separado los métodos de evaluación eran en sí mismos lógicos y proporcionaban ideas interesantes, las comparaciones claras entre los estudios no son prácticas, porque los métodos no eran, o solo eran en parte, comparables.

Durante el proyecto del 6PM "WasteWaterResource", los especialistas pedagógicos en el equipo expresaron algunos comentarios críticos sobre el

uso de cuestionarios para medir los impactos en la conciencia ecológica y el comportamiento entre los estudiantes (Scheidegger y Wilhelm 2006):

- En los cuestionarios de opción múltiple, los estudiantes tienden a proporcionar las respuestas que creen que al profesor le gustaría escuchar.
- Los niños a menudo tienen dificultades para clasificar sus respuestas a preguntas como "¿cómo fue mi motivación en las conferencias de Aquaponic?" (1: muy bajo a 5: extremadamente alto).
- Las respuestas están muy influenciadas por el profesor y los objetivos actuales de la educación.

Por lo tanto, es cuestionable si los métodos de encuesta cuantitativa son apropiados para revelar los efectos potenciales y si proporcionan datos realistas sobre las percepciones de los estudiantes.

Parece más apropiado enfocarse en métodos de evaluación cualitativa, como entrevistas semiestructuradas con los maestros, o el proceso de autoobservación de acuerdo con el método de investigación de acción descrito por Altrichter y Posch (2007). Los maestros son profesionales que tienen experiencia a largo plazo en el trato con los estudiantes y, por lo tanto, pueden proporcionar información mejor y más profunda sobre un impacto potencial que lo que puede revelar una encuesta.

Una entrevista o diálogo más profundo con los maestros también proporcionará información sobre temas críticos de los sistemas de aprendizaje e ideas sobre su desarrollo posterior. La pregunta de investigación "¿cómo percibieron los maestros el material?" Por lo tanto, parece proporcionar mucha más información útil que la pregunta "¿Cuál fue el impacto en los estudiantes?"

Una cuestión clave para la difusión exitosa de nuevas unidades docentes parece ser una integración robusta de las unidades en los marcos escolares nacionales. Los comentarios de las escuelas indican que los maestros tienen un tiempo muy limitado para encontrar e iniciar nuevas ideas y materiales de enseñanza. Usualmente usan portales de información ya establecidos que proporcionan el material en una forma que corresponde al plan educativo nacional y está listo para un nivel escolar particular. Por lo tanto, es necesario establecer una cooperación con los actores clave en los marcos pedagógicos nacionales. Para evaluar mejor los impactos de la acuaponía en los temas STEM, el medio ambiente y otros resultados de aprendizaje, sería un estudio comparativo entre las instituciones educativas donde utilizaron la acuaponía como una herramienta de enseñanza basada en los mismos métodos de investigación bien diseñados y abordan-

do varios objetivos de enseñanza. necesario.

Agradecimientos Este trabajo fue apoyado en parte por los fondos recibidos de la Acción COST FA1305 "El Centro de Acuaponia de la UE: Realización de una producción sostenible integrada de pescado y verduras para la UE".

Reconocemos la contribución de la UE (FP6-2004-Science-and-society-11, ContractNúmero 021028) al proyecto "WasterWater Resource", y gracias a todo el equipo, especialmenteNils Ekelund, Snorre Nordal y Daniel Todt.Reconocemos la contribución de la UE (proyecto de transferencia de innovación Leonardo da Vinci, número de acuerdo - 2012-1-CH1-LEO05-00392) al proyecto Aqua-Vet, y agradecemos a todo el equipo, especialmente Nadine Antenen, Urška Kleč, Aleksandra Krivograd Klemenčič, Petra Peroci y Uroš Strniša.

REFERENCIAS

Altrichter H, Posch P (2007) Lehrerinnen und Lehrer erforschen ihren Unterricht. Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn.

Bamert R (2007) Kinderleichte Wasseranalysen und Bonitierungsmethoden als Schlüssel zum Verständnis der Prozesse in Aquaponic. Diploma Thesis. Hochschule Wädenswil HSW. 71 pp. Available online: https://www.zhaw.ch/storage/lsfm/dienstleistung/schulen/play-with-water/kinderleichte-wasseranalysen.pdf. Accessed on 28 Feb 2018

Bamert R, Albin V (2005) Aquaponic als Unterrichtsmodell. Term Thesis. Hochschule Wädenswil HSW. 90 pp. Available online: https://www.zhaw.ch/storage/lsfm/dienstleistung/schulen/play- with-water/unterrichtsmodell-aquapoinic.pdf. Accessed on 18 Feb 2018

Baumann K (2014) Adaptation der Unterrichtsmaterialen der FBA (Fachbezogene Berufsunabhängige Ausbildung) Aquakultur für die Berufsschulen. Term Thesis. Zurich Uni- versity of applied Sciences (ZHAW), 48 pp., Waedenswil

Bollmann-Zuberbuehler B, Frischknecht-Tobler U, Kunz P, Nagel U, Wilhelm Hamiti S (2010) Systemdenken foerdern: Systemtraining und Unterrichtsreihen zum vernetzten Denken: 1.-9. Schuljahr. Published by Schulverlag plus, Bern. 94 pp. ISBN: 978-3-292-00628-8

Clayborn J, Medina M, O'Brien G (2017) School gardening with a twist using fish: encouraging educators to adopt aquaponics in the classroom. Appl Environ Edu Commun 16(2):93–104. https://doi.org/10.1080/1533015X.2017.1304837

Council of the European Union (1998) Council Directive 98/58/EC of 20

July 1998 concerning the protection of animals kept for farming purposes. Off J Eur Commun:23–27. Available online: http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/58/oj. Accessed 22 Mar 2018

Duschl RA, Schweingruber HA, Shouse AW (eds) (2007) Taking science to school: learning and teaching sciences in Grades K-8. committee on science learning, Kindergarten through Eighth Grade, 404p. ISBN 0-309-66069-6

Genello L, Fry JP, Frederick JA, Li X, Love DC (2015) Fish in the classroom: a survey of the use of Aquaponics in education. Eur J Health Biol Edu 4(2):9–20. https://doi.org/10.12973/ejhbe.2015.213p

Graber A, Antenen N, Junge R (2014) The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. In: Maček Jerala M, Maček MA (eds) Conference VIVUS: transmis- sion of innovations, knowledge and practical experience into everyday practice, Collection of Papers, Strahinj, 14–15. Biotehniški center Naklo, Strahinj, pp 245–255. ISBN 978-961-93564-4-9

Graham H, Beall DL, Lussier M, McLaughlin P, Zidenberg-Cherr S (2005) Use of school gardens in academic instruction. J Nutr Edu Behav 37(3):147–151

Hart ER, Webb JB, Danylchuk AJ (2013) Implementation of aquaponics in education: an assess- ment of challenges and solutions. Sci Edu Int 24(4):460–480. Available online: https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1022306.pdf

Hart ER, Webb JB, Hollingsworth C, Danylchuk AJ (2014) Managing expectations for aquaponics in the classroom: enhancing academic learning and teaching an appreciation for aquatic resources. Fisheries 39(11):525–530. Available online: https://fisheries.org/docs/wp/AFS-Fish eries-November-2014.pdf#page¼48. 25 Dec 2017

Hofstetter U (2007) Aquaponic – ein Unterrichtsmodul über den geschlossenen Kreislauf von Wasser und Nährstoffen. Term Thesis, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil. 61 pp. Available online: https://www.zhaw.ch/storage/lsfm/dienstleistung/ schulen/play-with-water/aquaponic-unterrichtsmodul-geschlossener-kreislauf.pdf. Accessed 20 Feb 2018

Hofstetter U (2008) Aquaponic im Unterricht, Bachelor Thesis, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil. 105 pp. Available online: https://www.zhaw.ch/storage/lsfm/dienstleistung/schulen/play-with-water/aquaponic-im-unterricht.pdf. Accessed on 18 Feb 2018

Junge R, König B, Villarroel M, Komives T, Jijakli MH (2017) Strategic Points in Aquaponics. Water 9(3):182. https://doi.org/10.3390/w9030182

Junge R, Wilhelm S, Hofstetter U (2014) Aquaponic in classrooms as a tool

to promote system thinking. In: Maček Jerala M, Maček MA (eds) Conference VIVUS: transmission of innova- tions, knowledge and practical experience into everyday practice, Collection of Papers, Strahinj, 14–15. Biotehniški center Naklo, Strahinj, pp 234–244. ISBN 978-961-93564-4-9

Kennedy G (2008) Writing and using learning outcomes, EUA Bologna Handbook. RAABE Publishing, Berlin

Kolb D (1984) Experiential learning as the science of Learning and development. Prentice Hall, Englewood Cliffs

Krivograd Klemenčič A, Jarni K, Griessler Bulc T (2013) Akvaponika kot izobraževalno orodje v poklicnem in strokovnem izobraževanju. (Aquaponics as an educational tool in vocational and professional education). Didakta, Vol. XXII, Nr. 167, pp 42–45

Maucieri C, Forchino AA, Nicoletto C, Junge R, Pastres R, Sambo P, Borin M (2018) Life cycle assessment of an aquaponic system built using recovered material for learning purposes. J Clean Prod 172:3119–3127. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.097

Nagel U, Wilhelm-Hamiti S (2008) Komplexität erproben und erlernen – Elemente einer Didaktik des systemischen Denkens. Available online: http://www.umweltbildung.at/cms/download/359. pdf. 08 Mar 2018

Ossimitz G (1996) The development of systems thinking skills using system dynamics modeling tools. http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/e/gdm/1996/ossimitz.pdf. 07 Mar 2018

Ossimitz G (2000) Entwicklung systemischen Denkens. Theoretische Konzepte und empirische Untersuchungen, Profil Verlag, München Wien, pp 256. ISBN-13: 978-3890194943

Peroci P (2016) Vključevanje akvaponike v učni proces srednješolskega poklicnega izobraževanja v Sloveniji. (Inclusion of aquaponics in the educational process of secondary vocational education in Slovenia.). Master Thesis, Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za biologijo. Maribor, Slovenia. 186 pp. Available at https://www. researchgate.net/publication/307476342

Podgrajšek B, Schmautz Z, Krivograd Klemenčič A, Jarni K, Junge R, Griessler Bulc T (2014) Preliminary monitoring of an aquaponic system in Biotechnical Centre Naklo. Moje podeželje 5 (9):10–11. ISSN 1855-9204

Quaden R, Ticotsky A (2004) The shape of change. Creative Learning Exchange, Acton. Available http://www.clexchange.org/cleproducts/shapeofchange.asp

Scheidegger B, Wilhelm S (2006) Bildungsarbeit mit Aquaponic-Systemen. Unpublished. Avail- able online: https://www.zhaw.ch/storage/lsfm/dienstleistung/schulen/play-with-water/ScheideggerWilhelm_2006 Umweltbildung_mit_Aquaponic.pdf.

Accessed on 07 Mar2018
Schneller AJ (2015) A case study of indoor garden-based learning with hydroponics and aquaponics: evaluating pro-environmental knowledge, perception, and behavior change. Appl Environ Edu Commun 14:256–265. https://doi.org/10.1080/1533015X.2015.1109487
UNESCO-UIS (2012) International standard classification of education ISCED 2011. UNESCO Institute for Statistics, Montreal, Quebec, Canada. ISBN 978–92–9189-123-8. 88 pp. Available online: http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classification- of-education-isced-2011-en.pdf. Accessed on 05 Jan 2018
UNESCO-UIS/OECD/EUROSTAT (2017) Data collection on formal education. Manual on con- cepts, definitions and classifications. Available online: http://uis.unesco.org/sites/default/files/ documents/uoe2016manual_11072016_0.pdf. Accessed on 20 Feb 2018
UNICEF (2018) Goal: achieve universal primary education. Available online: https://www.unicef. org/mdg/education.html. Accessed 11 Mar 2018
Wardlow GW, Johnson DM, Mueller CL, Hilgenberg CE (2002) Enhancing student interest in the agricultural sciences through aquaponics. J Nat Resour Life Sci Edu 31:55

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 23

¿ALIMENTOS, SOSTENIBILIDAD Y ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA EN UN SOLO PAQUETE? OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN EL USO DE LA ACUAPONÍA ENTRE LOS JÓVENES EN LA ESCUELA, UN PERSPECTIVA DANÉSA

Bent Egberg Mikkelsen and Collins Momanyi Bosire

Capítulo 23

¿ALIMENTOS, SOSTENIBILIDAD Y ALFABETIZACIÓN CIENTÍFICA EN UN SOLO PAQUETE? OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN EL USO DE LA ACUAPONÍA ENTRE LOS JÓVENES EN LA ESCUELA, UN PERSPECTIVA DANÉSA

Bent Egberg Mikkelsen and Collins Momanyi Bosire

Resumen

El llamado a la producción y el consumo sostenible de alimentos ha generado un mayor interés y nuevas medidas políticas para apoyar la economía circular y las prácticas agrícolas climáticamente inteligentes. Los méritos de la acuaponía y los sistemas del ciclo de nutrientes de circuito cerrado se examinan cada vez más en términos de productividad sostenible en varios entornos, incluidos los entornos urbanos. La acuaponia también tiene el potencial de ser aplicada como una herramienta de aprendizaje para personas de todas las edades, pero especialmente para los jóvenes en la escuela. Este capítulo estudia el potencial de la acuaponía para enseñar alfabetización alimentaria y científica y el uso de la tecnología como herramienta educativa en la escuela primaria. El capítulo se basa en datos del programa Growing Blue & Green (GBG) llevado a cabo en cooperación entre la Universidad de Aalborg, Copenhague, las escuelas municipales y sus profesores y una empresa privada de acuaponía. El capítulo se basa en tres estudios empíricos que incluyen un estudio exploratorio sobre las oportunidades educativas en la escuela, un estudio de viabilidad realizado entre docentes, así como el educativo Growing Blue & Green (eGBG), en el que se agregó un componente de regulación digital. La conclusión es que las versiones de bajo costo de la acuaponía tienen un potencial considerable para el aprendizaje de apoyo en la escuela primaria. Además, los hallazgos preliminares sugieren que equipar la configuración

B. E. Mikkelsen (*)
Integrated Food Studies, Aalborg University Copenhagen, Copenhagen, Denmark
E-mail: bemi@learning.aau.dk
C. M. Bosire
Department of Learning & Philosophy, Aalborg University, Copenhagen, Denmark

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_23

con sensores y dispositivos inteligentes fáciles de instalar ofrece la oportunidad de brindar aprendizaje sobre alimentos, sostenibilidad y una comprensión básica del control y la gestión de sistemas biológicos en un solo paquete.

Palabras clave: Acuaponía; Educación para la sostenibilidad; Conocimientos científicos; Conocimientos alimentarios; Educación; Escuela primaria.

23.1 INTRODUCCIÓN

La producción y el consumo sostenibles de alimentos son importantes desafíos sociales. El crecimiento de la población, la escasez de tierras cultivables y la urbanización son factores importantes en esta área, lo que lleva a un interés creciente en nuevas tecnologías sostenibles de producción de alimentos, que no están necesariamente confinadas a entornos marítimos o rurales. La acuaponía es una de estas tecnologías que ha recibido una mayor atención, en particular, ya que se puede aplicar fácilmente también en entornos urbanos. Estas nuevas tecnologías, incluida la acuaponía, también ofrecen nuevas oportunidades como herramientas de aprendizaje para personas de todas las edades, pero son particularmente atractivas para los jóvenes en la escuela. Este capítulo informa sobre los hallazgos del programa educativo Growing Blue & Green (GBG) que se ha desarrollado y probado en entornos educativos en el área del Gran Copenhague. Estudios adicionales también sugieren que parece haber potencial para usar la acuaponía como una forma clave de aprender sobre la producción sostenible de alimentos en un amplio espectro de disciplinas académicas en la escuela, ya que puede integrarse fácilmente en el plan de estudios educativo existente. Algunos estudios han examinado la aplicación de la acuaponía en un contexto educativo. Graber y col. (2014) estudiaron el potencial de la acuaponía como un método de producción de alimentos para áreas urbanas que enseña a los alumnos de séptimo grado temas de sostenibilidad en las clases de ciencias. La idea detrás del concepto era presentar y capacitar a los estudiantes en el "pensamiento sistémico" combinando el cultivo de peces y plantas. Junge y col. (2014) mostró que la capacidad de los estudiantes para pensar de manera sistemática mejoró significativamente como resultado. El estudio también sugirió que, basándose en el aprendizaje social en grupos, los estudiantes desarrollaron mayores habilidades de trabajo en equipo. Sin embargo, aparte de estos ejemplos, la literatura sobre acuaponía es relativamente limitada y la mayoría de los artículos disponibles se han centrado en los aspectos tecnológicos de los sistemas. Este capítulo intenta

llenar esta brecha de conocimiento explorando las oportunidades para integrar la tecnología acuapónica en el aprendizaje escolar y descubrir algunas de las limitaciones y oportunidades.

El capítulo se basa en tres casos empíricos, en los que la acuaponía se ha aplicado en entornos de escuelas primarias en el área del Gran Copenhague. Esto incluye un estudio exploratorio sobre las oportunidades educativas en la escuela (Bosire et al. 2016), un estudio de viabilidad realizado entre docentes (Bosire y Sikora 2017), así como las percepciones de la primera parte de un programa educativo Growing Blue & Estudio verde (Toth y Mikkelsen 2018).

El objetivo de este capítulo es, por lo tanto, presentar y discutir la acuaponía educativa. Intervenciones en las que se utiliza la acuaponía en una escuela primaria en Dinamarca y para discutir cómo la teoría puede llevarse a la práctica. El capítulo analiza el potencial de la acuaponía para contribuir al fomento de un aprendizaje más profundo sobre la producción de alimentos urbana y sostenible entre los niños en edad escolar en entornos escolares, así como los potenciales para crear alfabetización digital mediante la adición de un sistema de autorregulación. herramienta digital de detección y mantenimiento, es decir, la herramienta eGBG.

23.2 FUNDAMENTO CONCEPTUAL

Se puede esperar que el apoyo al desarrollo sostenible (DS) del sistema alimentario a través de esfuerzos educativos sea una buena inversión, ya que los escolares son los futuros responsables políticos y productores.

Según Shephard (2008), los educadores y, en particular, los educadores superiores se han centrado tradicionalmente en el dominio cognitivo del aprendizaje sin poner mucho énfasis en la educación primaria. Creemos que el uso de herramientas de aprendizaje adecuadas en la escuela primaria puede ser un pilar esencial para lograr un cambio positivo a largo plazo en las sociedades. Estos pueden realizarse a través de enfoques alternativos de aprendizaje y enseñanza, diferentes de los enfoques deductivos tradicionales como "aprender haciendo" y "aprendizaje experiencial", promovidos por Dewey (1997) en su experiencia laboral y educación. En nuestro trabajo de investigación, presentamos un tipo de perspectiva dimensional extracurricular, donde agregamos a los resultados del aprendizaje de los alumnos al aprovechar el dominio afectivo, que se enfoca en intereses, actitudes, apreciaciones, valores, comportamientos cambiantes y conjuntos o prejuicios emocionales (Shephard et al.2015). La acuaponía práctica promete ofrecer una herramienta práctica de aprendizaje inductivo basada en problemas para la educación.

Todos los casos de estudio se basan en la idea de Service Learning (SL), donde los estudiantes utilizan conocimiento académico para abordar las necesidades de la comunidad y el triángulo del conocimiento (educación, investigación e innovación), que son parte de la enseñanza en el programa de Estudios Integrados de Alimentos (IFS) en la Universidad de Aalborg (Mikkelsen y Justesen 2015). El IFS también utiliza el aprendizaje basado en problemas (PBL), donde el aprendizaje se aborda con problemas abiertos sin una respuesta correcta absoluta, así como enfoques de SL. SL es un enfoque pedagógico que tiene sus raíces en el ABP, así como en el enfoque de aprendizaje experiencial (McKay-Nesbitt et al. 2012). Usando el enfoque SL, se espera que los estudiantes se involucren en proyectos basados en las necesidades, deseos y demandas de las comunidades locales. El interés reciente en reformar las prácticas y estrategias educativas hace que el uso de la acuaponía sea un componente importante en el contexto educativo oportuno y relevante. Además, el uso de métodos inductivos como el ABP y el aprendizaje basado en la disciplina (Wood 2003: Armstrong 2008), así como el aprendizaje experiencial (Beard 2010; McKay-Nesbitt et al. 2012), donde se utilizan problemas y preguntas de la vida cotidiana para informar el proceso de aprendizaje, se está extendiendo. Todos estos conceptos son favorables para la enseñanza de la acuaponia. Además, la idea de SL es compatible con el concepto de enseñanza acuapónica y la reciente reforma escolar danesa (Ministerio de Educación de Dinamarca 2014) que presenta pautas sobre cómo integrar los aspectos prácticos y teóricos del plan de estudios.

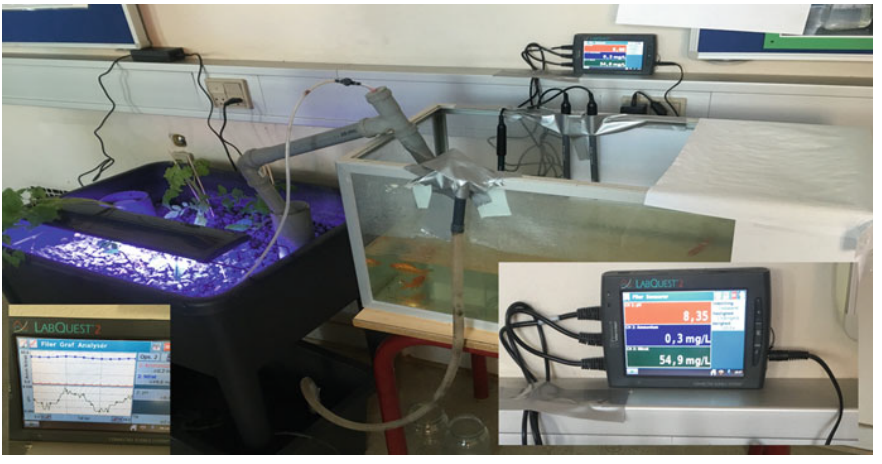


Fig. 23.1 El aprendizaje acuapónico y la maqueta experimental. La ilustración muestra la configuración que incluye el tanque de peces de acuario y los dispositivos de monitoreo que se utilizan para medir el equilibrio de todo el sistema. La última parte es el núcleo del objetivo de aprendizaje de los estudiantes. (Imágenes: cortesía de Lija Gunnarsdottir).

Si bien hay varios sistemas acuapónicos que pueden ser suministrados por los fabricantes y/o sistemas a medida diseñados por consultores, la tecnología acuapónica en principio es bastante simple. Por lo tanto, los estudiantes pueden comprender bien los principios básicos, y los estudiantes pueden diseñar, construir y monitorear los sistemas utilizando una variedad de materiales y métodos, que van desde los básicos hasta los sofisticados. Tomando esto como premisa, la acuaponía es, por lo tanto, una tecnología muy adecuada para el enfoque del triángulo del conocimiento.

La educación puede mejorarse mediante la creación de vínculos entre los tres lados del triángulo del conocimiento, es decir, educación, investigación e innovación. El pensamiento innovador sobre cómo se podría implementar la educación para la sostenibilidad utilizando herramientas educativas prácticas lleva al educador hacia la acuaponía: un método de producción de alimentos que es esencialmente una integración simbiótica de dos disciplinas maduras: recirculación de la acuicultura y la hidroponía en un sistema de producción, donde los peces vivos generan nutrientes. para la producción vegetal. En una escuela primaria de Copenhague se instaló una unidad de sistema acuapónico simple, como la que se muestra en la figura 23.1. La figura ilustra algunos de los componentes básicos utilizados con un breve detalle de su principio de funcionamiento: un simple acuario donde el agua en la pecera se mantiene a una altura constante mediante un diseño adecuado para la comodidad de los peces. A través de una acción de bombeo desde un tanque de sumidero situado debajo del lecho de cultivo, el exceso de agua que contiene desechos de pescado se recicla a través de los lechos de cultivo de plantas, donde se alojan las bacterias y otros microbios.

El sumidero y el lecho de cultivo actúan juntos como filtros mecánicos y biofiltros, respectivamente, por eliminar sólidos y desechos disueltos, la configuración de la figura 23.1 ilustra un ejemplo educativo práctico, centrado en la sostenibilidad, ya que proporciona un ejemplo práctico de cómo se pueden abordar los objetivos establecidos en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible (ONU 2015b). El objetivo número 2, que tiene como objetivo acabar con el hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible, y el objetivo número 4, que se centra en garantizar una educación de calidad inclusiva y equitativa.

La promoción de oportunidades de aprendizaje permanente para todos (ONU 2015b). Estos temas cruciales pueden incluirse en el enfoque de

aprendizaje basado en problemas (ABP) que se ha desarrollado en el caso de GBG. Basado en una creencia firme compartida en tener soluciones tecnológicas para los problemas de los sistemas alimentarios contemporáneos, el enfoque GBG contribuye a una demostración de "modernización ecológica" en los procesos de producción de alimentos. A través del desarrollo de la didáctica para los temas eGBG de sostenibilidad y alfabetización alimentaria, quedó claro que para que un sistema de este tipo produzca cambios, es necesaria la plataforma adecuada a través de la cual se puedan intercambiar conocimientos y habilidades entre los jóvenes y sus maestros en el entorno escolar.

Otros estudios han demostrado que la falta de alfabetización alimentaria y nutricional entre los jóvenes es una preocupación creciente (Vidgen y Gallagos 2014; Dyg y Mikkelsen 2016). Esto es particularmente preocupante, ya que las formas convencionales de producción de alimentos y los actuales impulsores persistentes de la ciencia y la tecnología han impulsado la explotación mundial insostenible de los recursos de la tierra, lo que ha generado numerosos desafíos dentro del sistema alimentario (FAO 2010; PNUD 2016). Además, el aumento de la población mundial y la rápida urbanización han sobrecargado el sistema alimentario. Las Naciones Unidas pronostican que la población mundial aumentará en más de mil millones de personas en los próximos 15 años, alcanzando los 8.5 mil millones en 2030. De ellos, se prevé que la mayoría (66%) vivirá en ciudades para el año 2050 (ONU 2015a). Estas tendencias, en combinación con el aumento de los hábitos alimentarios poco saludables y los trastornos relacionados con la nutrición, han hecho imperativo un nuevo enfoque de la nutrición alimentaria y la alfabetización agrícola en la escuela.

Los conocimientos del proyecto GBG y los resultados de numerosas entrevistas con profesores y estudiantes mostraron que la aplicación exitosa de la tecnología acuapónica depende de la planificación y el mantenimiento cuidadosos del sistema. La versión digital del GBG, el eGBG, se desarrolló para abordar estos desafíos y utilizar las oportunidades relacionadas para promover la alfabetización digital en la escuela. La idea del eGBG se inspira en la idea de autorregulación en sistemas biológicos. Se basa conceptualmente en la idea de autopoiesis: se refiere a un sistema capaz de reproducirse y mantenerse a sí mismo. El término introducido por primera vez en 1972 por los biólogos Maturana y Varela (1980) describe la química de mantenimiento de las células vivas y, desde entonces, el concepto se ha aplicado en una amplia gama de campos como la cognición, la teoría de sistemas y la sociología. En el estudio eGBG, ilustrado por la configuración y los componentes en la Fig. 23.2, la calidad del agua, la temperatura, el oxígeno disuelto, el CO2, el pH, el amoníaco y

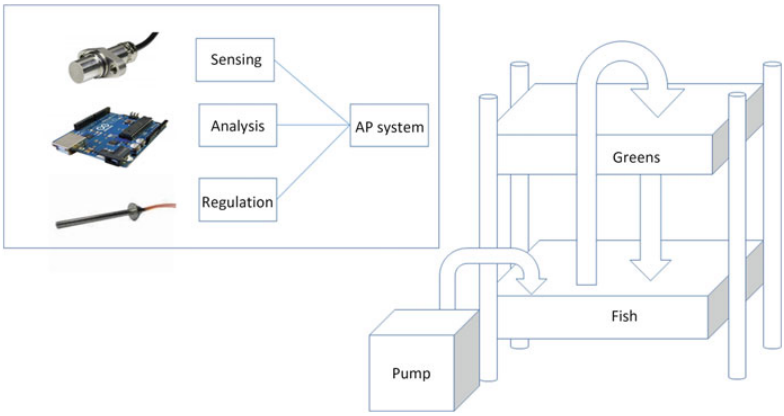


Fig. 23.2 La configuración experimental de eGBG. La ilustración muestra las dos partes del sistema. El sistema acuapónico en sí y los dispositivos de medición y el miniordenador utilizado para seguir la condición biológica del sistema eGBG.

el contenido de nitrito se mide con sensores usando una configuración electrónica y digitalizada, seguida de la apropiada automatización regulación y ajustes a los niveles requeridos o establecidos. Este sistema, que se utiliza junto con un régimen de mantenimiento básico, permite que los niños aprendan tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), junto con materias de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM), además de una comprensión más amplia de las prácticas de agricultura urbana sostenible y bienestar animal. El eGBG minimiza el error humano y reduce la cantidad de recursos críticos como el trabajo físico y las horas que de otro modo serían necesarias para el cuidado y mantenimiento de un sistema acuapónico equilibrado.

23.3 MÉTODOS

En el contexto de este capítulo, se utilizaron tres fuentes de datos que incluyen (a) un estudio exploratorio sobre las oportunidades educativas en la escuela (Bosire et al. 2016), (b) un estudio de viabilidad realizado entre docentes (Bosire y Sikora 2017) y (c) el estudio eGBG (Toth y Mikkelsen 2018).

El primer estudio (a) se llevó a cabo como una exploración de las oportunidades y desafíos del uso de la acuaponía como herramienta educativa. El estudio tuvo como objetivo investigar hasta qué punto tiene sentido utilizar la acuaponía en la enseñanza escolar. Se recopilaron datos de tres (N = 3) entrevistas cualitativas independientes. Los informantes fueron (1) un profesor de biología dedicado a la enseñanza de las ciencias naturales en la escuela primaria; (2) un empresario consultor, que también es un experto

en acuaponía; y (3) un bioagricultores acuapónicos locales. El procedimiento de análisis de datos se inspiró en el enfoque del futuro taller (Jungk y Müllert 1987), lo que llevó a una categorización y evaluación de acuerdo con las tres categorías de crítica, fantasía y estrategia.

En el segundo estudio (b), se llevó a cabo un estudio de viabilidad en la Escuela Pública de Blågaard ubicada en el municipio de Copenhague en cooperación con dos profesores de biología y un profesor de física y con la aprobación de la administración de la escuela. También participó el bioagricultores y experto en acuaponía local. Se desarrolló una instalación acuapónica de bajo costo para la enseñanza utilizando un sistema simple de producción de alimentos de bricolaje y componentes listos para usar. La idea de este diseño y construcción fue ilustrar que este tipo de tecnología puede emprenderse fácilmente, y no es solo para el crecimiento urbano avanzado, sino que también tiene potencial para ser utilizado como una herramienta de enseñanza de la ciencia en entornos más humildes como como escuela local.

Dado que el presupuesto de la escuela es limitado, el objetivo general era completar el proyecto a bajo costo y adaptar cuidadosamente el sistema a los requisitos de los planes de estudio existentes.

En el tercer estudio (c), se agregó un componente digital a una versión mejorada del sistema acuapónico y se introdujo el eGBG. El eGBG es un programa de aprendizaje basado en acuaponía simple y está diseñado para crear conocimientos de aprendizaje entre los adolescentes. El programa se centra especialmente en la enseñanza de los principios de la producción alimentaria sostenible en las ciudades y, al mismo tiempo, en facilitar el aprendizaje de las TIC. La didáctica del programa tiene como objetivo mostrar cómo un sistema biológico como la acuaponía se puede controlar, maniobrar y autorregular mediante sensores y mecanismos de retroalimentación. Esto se hace conectando sensores que miden la temperatura, el pH y el equilibrio de nutrientes a través de una interfaz digital como Arduino. El eGBG desarrolló una herramienta de agricultura urbana simple basada en un paquete de aprendizaje para escuelas donde los estudiantes pueden aprender sobre esta tecnología en clases de biología. Al estudiar cómo funcionan los sensores, tienen la capacidad de aprender cómo se pueden integrar las TIC para monitorear y controlar un sistema biológico vivo.

El programa educativo eGBG se puede utilizar tanto en un curso interdisciplinario con las TIC como tema o en las asignaturas de biología, física y química. Los componentes del eGBG son para un sistema acuapónico de

bajo costo que se ha desarrollado para el contexto escolar como se describió anteriormente. Algunos de los elementos clave fueron suministrados por BioTeket, que es una empresa con un cometido social y cultural con énfasis en la tecnología ambiental. BioTeket ofrece una serie de talleres y eventos que brindan a los ciudadanos de Copenhague la oportunidad de adquirir experiencia con la vida urbana sostenible. El montaje se realizó bajo la supervisión técnica de la empresa. Según los planes de estudios nacionales, las TIC en la escuela primaria se enseñan no como una asignatura independiente, sino de manera transversal que abarca varias asignaturas. Por lo tanto, la combinación de un sistema biológico y de control inteligente y basado en sensores parece sencillo para este requisito. Las tecnologías de agricultura urbana requieren un sistema de monitorización con multitud de sensores, ya que mantener un sistema en equilibrio requiere una medición continua de temperatura, pH, etc. Para cumplir con este requisito, el eGBG se desarrolló en cooperación entre la Universidad de Aalborg, una escuela municipal en Albertslund. y la empresa BioTeket. El proceso de desarrollo se configuró como un estudio de investigación-acción en el que se recopilaron datos junto con el proceso de desarrollo.

23.4 HALLAZGOS Y DISCUSIÓN

1. Desde el primer estudio, los hallazgos mostraron que las visiones de una nueva forma de enseñar con la inclusión de la tecnología moderna podrían percibirse como una ventaja para influir en los procesos de transformación en la escuela. Sin embargo, este proceso requiere algunas consideraciones críticas, prácticas y teóricas para que la implementación del sistema lo haga exitoso y sostenible en el largo plazo. Algunos de los aspectos positivos desde la perspectiva de los usuarios incluyeron una amplia gama de aplicaciones en las materias de biología, matemáticas, ciencias y más. Reducción contaminación y uso eficiente de los recursos; flexibilidad de la configuración del sistema, por ejemplo, en tejados; y la producción de productos gemelos (similares a los orgánicos*) (pescado y alimentos vegetales). Las posibles limitaciones incluían limitaciones de tiempo, falta de recursos financieros, así como la necesidad de cuidados y mantenimiento frecuentes. (* En la UE, la legislación actual establece que solo los productos vegetales cultivados en el suelo pueden considerarse "orgánicos". Este no es el caso, por ejemplo, en los EE. UU., Donde los productos acuapónicos pueden cultivarse orgánicamente y venderse legalmente como orgánicos).

2. A partir del segundo estudio (b), el estudio de factibilidad, las experiencias del estudio indicaron que el concepto de aprendizaje, la idea general

y la didáctica encajan bien en los planes de estudio educativos y también con los proyectos que la escuela ya había planeado emprender en el campo de la sostenibilidad. La experiencia demostró que esa enseñanza debe planificarse cuidadosamente con mucha anticipación. Además, la idea de un enfoque de triángulo del conocimiento, que integra el aprendizaje en servicio, la investigación universitaria, una pequeña empresa y el personal de aprendizaje en un proyecto informal y una red de innovación, es una forma fructífera de organizar la empresa. Además, la iniciativa cuenta con el apoyo del municipio que ve el espíritu empresarial y los enfoques de aprendizaje innovadores como objetivos importantes.

3. El tercer estudio (c), el estudio eGBG, mostró que la escuela fue solidaria y ya tenía sensores recién comprados para medir el pH, la temperatura, el CO_2 y el oxígeno disuelto (OD). Por lo tanto, los datos se pudieron obtener con un mínimo esfuerzo de capacitación, ya que el personal docente ya estaba bien preparado para recopilar datos digitalmente. La escuela, en el punto de inicio del proyecto, ya estaba planeando medir el nitrato y el amoníaco usando los sensores, ya que el concepto básico de la enseñanza era incrementar el conocimiento, la habilidad y la competencia en relación al ciclo del nitrógeno. La idea de crear tecnología acuapónica y aplicarla en la enseñanza fue fácilmente aceptada por la escuela, ya que la escuela vecina ya tenía ese tipo de sistema AP en funcionamiento.

Agradecimientos Gracias a los profesores de biología Mette y Else de la escuela Blågård en el municipio de Copenhague, a Lilja Gunnarsdottir y a los profesores de la escuela Herstedlund, ya Inge Christensen del Nature Center del municipio de Albertslund. Gracias también a Viktor Toth, estudiante de Integrated Food Studies, Aalborg University, por proporcionar datos del estudio eGBG. Gracias también a Tomasz Sikora y Kathrine Breidahl de Integrated Food Studies que participaron en el trabajo de campo. Gracias también al propietario y director ejecutivo Lasse Antoni Carlsen de Bioteket, Copenhague, por proporcionar componentes y orientación en el desarrollo del programa GBG.

REFERENCIAS

Armstrong EG (2008) A hybrid model of problem-based learning. In: Boud D, Feletti G (eds) The challenge of problem-based learning. Routledge, London

Beard C (2010) The experiential learning toolkit: blending practice with concepts. Kogan Page, London

Bosire CM, Sikora TA (2017) Blue-green farms of the future: using aquaponics at Primary School to Foster sustainable development

(Master thesis). Retrieved from http://projekter.aau.dk/projekter/files/259876456/Collins_Bosire_Tomasz_SikoraBlue_Green_Farms_of_the_Future_EMT.pdf

Bosire CM, Breidahl KS, Sikora TA, Mikkelsen BE (2016) Education for sustainability and food literacy – assessing opportunities and challenges for using aquaponics among young people at Schools. In: Mikkelsen BE, Ofei KT, Tvedebrink TDO, Romani AQ, Sudzina F (eds) Pro- ceedings from 10th international conference on culinary arts and sciences, July 5–7th 2017 Aalborg University Copenhagen – Exploring Future Foodscapes, Published by Captive Food Studies. AAU Aalborg, p 250–267

Danish Ministry of Education (2014) Improving the public school–overview of reform of standards in the Danish Public School (primary and lower secondary education) The Danish Ministry of Education. Available at http: www.uvm.dk/publicschool. ISBN (Electronic version): 978-87-603. Accessed 24 May 2016

Dewey J (1997) Experience and education. Kappa Delta Pi, Touchstone. (Original work published 1938)

Dyg PM, Mikkelsen BE (2016) Cooperation models, motivation and objectives behind farm–school collaboration: case insights from Denmark. Int J Soc Agric Food 23(1):41–62

Food and Agriculture Organization (2010) Sustainable diets and biodiversity: directions and solutions for policy, research and action. International scientific symposium, biodiversity and sustainable diets united against hunger. Rome, Italy, 3–5 November 2010

Graber A, Antenen N, Junge R (2014) The multifunctional aquaponic system at ZHAW used as research and training lab. Available at http://pd.zhaw.ch/publikation/upload/207534.pdf. Accessed 22 May 2016

Junge R, Wilhelm S, Hofstetter U (2014) Aquaponic in classrooms as a tool to promote system thinking. Available at http://www.adam-europe.eu/prj/10804/prj/Paper_VIVUSConf_Junge_et_al.pdf. Accessed 23 May 2016

Jungk R, Müllert N (1987) Future workshops: how to create desirable futures. Institute for Social Inventions, London

Maturana H, Varela F (1980) Realization of the living. In: Boston Studies in the Philosophy of Science, vol 42. Reidel, Dordrecht

McKay-Nesbitt J, DeMoranville CW, McNally D (2012) A strategy for advancing social marketing: social marketing projects in introductory marketing courses. J Soc Mark 2(1):52–69. https://doi.org/10.1108/20426761211203256

Mikkelsen BE, Justesen J (2015) Multi disciplinarily in higher educations for the captive foodscape profession: case of Denmark. In: Proceedings

of the international conference on culinary arts and eating in society. Montclair State University, Montclair, pp 262–263
Shephard K (2008) Higher education for sustainability: seeking affective learning outcomes. Int J Sustain High Educ 9(1):87–98
Shephard K, John H, Brent L, Miranda M, Sheila S, Liz S, Mick S, Mary F, Tim J, Lynley D (2015) Seeking learning outcomes appropriate for 'education for sustainable development' and for higher education. Assess Eval High Educ 40(6):855–866
Toth V, Mikkelsen BE (2018) Growing blue & green – exploring the potentials of teaching sustainable urban food the smart way. Protocol for extended master thesis at Integrated Food Studies, Aalborg University United Nations (2015a) World population prospects, the 2015 revision vol. 2: Demographic Pro- files. Available at http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2015_Volume-II-Demo graphic-Profiles.pdf. Accessed 8 Mar 2016
United Nations (2015b) Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. Available at https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld. Accessed 3 Mar 2017
United Nations Development Programme (2016) Overview: human development report 2016 human development for everyone (online). Available at http://hdr.undp.org/sites/default/files/HDR2016_EN_Overview_Web.pdf. Accessed 24 Mar 2017
Vidgen HA, Gallegos D (2014) Defining food literacy and its components. Appetite 76:50–59
Wood DF (2003) Problem based learning. BMJ 326 (7384):328–330. https://doi.org/10.1136/bmj.326.7384.328

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

Capítulo 24

ACUAPONÍA Y EMPRESA SOCIAL

Sarah Milliken and Henk Stander

Capítulo 24

ACUAPONÍA Y EMPRESA SOCIAL

Bent Egberg Mikkelsen and Collins Momanyi Bosire

Resumen
Este capítulo presenta algunos ejemplos de iniciativas recientes de empresas sociales que utilizan la acuaponía. La acuaponía ofrece una forma innovadora de horticultura terapéutica, que puede proporcionar empleo y promover el bienestar de las personas con discapacidad. Si se implementa como un programa para ser administrado por las comunidades locales, los sistemas acuapónicos también tienen el potencial de abordar temas como la seguridad alimentaria y la soberanía alimentaria, especialmente en áreas urbanas. La creciente familiaridad del público con la acuaponía ha hecho que se establezcan una serie de empresas sociales en todo el mundo. Sin embargo, la viabilidad de estos depende no solo del compromiso de las partes interesadas, un análisis de mercado exhaustivo, estructuras de gobierno claras y un plan de negocios sólido, sino también de factores externos, como el contexto político local y las regulaciones.

Palabras clave: Salud; Bienestar; Habilidades; Seguridad alimentaria; Soberanía alimentaria

24.1 INTRODUCCIÓN

Las empresas sociales, a diferencia de las empresas privadas o corporativas tradicionales, tienen como objetivo ofrecer productos y servicios que satisfagan las necesidades humanas básicas. Para una empresa social, la motivación principal no es maximizar las utilidades, sino construir capital social; Por tanto, el crecimiento económico es sólo una parte de un mandato mucho más amplio que incluye servicios sociales como rehabilitación, educación y formación, así como la protección del medio ambiente. Existe un interés creciente en la acuaponía entre las empresas sociales, porque representa una herramienta eficaz para ayudarlas a cumplir su mandato.

S. Milliken (*)
School of Design, University of Greenwich, London, UK
E-mail: S.Milliken@greenwich.ac.uk
H. Stander
Department of Animal Sciences (Division of Aquaculture), University of Stellenbosch, Stellenbosch, South Africa
E-mail: hbs@sun.ac.za

© The Author(s) 2019
S. Goddek et al. (eds.), *Aquaponics Food Production Systems*,
https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_23

Por ejemplo, la acuaponía puede integrar estrategias de medios de vida para asegurar alimentos y pequeños ingresos de los hogares pobres y sin tierra. La producción nacional de alimentos, el acceso a los mercados y la adquisición de habilidades son herramientas invaluables para asegurar el empoderamiento y la emancipación de las mujeres en los países en desarrollo, y la acuaponía puede sentar las bases para un crecimiento socioeconómico justo y sostenible (Somerville et al. 2014). Este capítulo presenta algunos ejemplos de iniciativas recientes de empresas sociales que utilizan la acuaponía.

24.2 SALUD, BIENESTAR Y HABILIDADES

La acuaponía ofrece una forma innovadora de horticultura terapéutica, un enfoque basado en la naturaleza que puede promover el bienestar de las personas con problemas de salud mental mediante el uso de una variedad de actividades ecológicas como la jardinería y el contacto con animales. Durante la última década, han surgido varias empresas sociales que ofrecen programas de horticultura terapéutica para mejorar el bienestar de las comunidades locales. El enfoque de empresa social se basa en las "empresas sociales" al facilitar que las personas con problemas de salud mental desarrollen nuevas habilidades y vuelvan a participar en el lugar de trabajo. Una empresa social es un tipo específico de empresa social donde la misión social es crear empleo, experiencia laboral, capacitación y oportunidades de voluntariado, dentro de un entorno de apoyo e inclusivo, para las personas que enfrentan barreras importantes para el empleo y, en particular, para las personas con una discapacidad (incluida la mala salud mental y la discapacidad de aprendizaje), problemas de abuso, antecedentes penales o problemas de personas sin hogar (Howarth et al. 2016).

Hay cualidades particulares de la relación planta-persona que promueven la interacción de las personas con su entorno y, por lo tanto, su salud, nivel funcional y bienestar subjetivo. Se considera que las plantas otorgan recompensas no discriminatorias a su cuidador sin imponer la carga de una relación interpersonal y, al responder al cuidado o la negligencia, pueden reforzar inmediatamente un sentido de agencia personal. También se ha demostrado la eficacia de la práctica de la horticultura en un contexto grupal. Muchas personas con problemas de salud mental y física se enfrentan a la exclusión social porque no tienen el mismo acceso a las oportunidades en la sociedad, incluido el empleo remunerado, la vivienda, la educación y el ocio. Las redes sociales como las que brindan las iniciativas de horticultura comunitaria pueden actuar como amortiguadores de los factores de estrés, proporcionar una estructura para adquirir habilidades y validar y mejorar la autoestima de un individuo (Diamant y

Waterhouse 2010; Fieldhouse 2003).

Hasta la fecha, hay pocos ejemplos de empresas sociales que utilizan la acuaponía para la horticultura terapéutica. En los Estados Unidos, está creciendo una pequeña empresa agrícola llamada Green Bridge Growers en Indiana (www.greenbridgegrowers.org) producir todo el año, principalmente con acuaponía. La empresa ahora emplea varios individuos con trastorno del espectro autista (TEA) y encuentra que la programación, la precisión y el monitoreo requeridos en acuaponía se adaptan perfectamente a sus habilidades (Fasciglione 2015). Un valor fundamental del negocio es involucrar a su fuerza laboral a través de capacitación en liderazgo, participación activa y formación de equipos, y brindarles la oportunidad de adquirir nuevas habilidades y competencias. De manera similar, el Proyecto ACRES (Adultos que crean soluciones residenciales y de empleo; https: // acresproject.org/aquaponics) en Pensilvania utiliza la acuaponía para brindar terapia hortícola, empleo e integración comunitaria para adultos con autismo y discapacidades intelectuales. Están involucrados en todas las facetas del sistema acuapónico, desde el cuidado y mantenimiento hasta la cosecha y las ventas, y los procedimientos programados y las rutinas diarias que requiere la acuaponia les brindan la estabilidad y estructura que encuentran tranquilizadores. Al fomentar las habilidades sociales, vocacionales y de autodefensa, ACRES utiliza la acuaponía para ayudar a las personas autistas a optimizar su potencial, desarrollar habilidades prácticas para la vida, aumentar la capacidad social y la transición al trabajo y la independencia.

El FabLab Nerve Center en Irlanda del Norte ha establecido una granja acuapónica de empresas sociales para enseñar a las personas con dificultades de aprendizaje habilidades empresariales y digitales. Usando equipos digitales de última generación, como impresoras 3D, enrutadores CNC y cortadoras láser, los estudiantes recibirán capacitación práctica y experiencia en una variedad de técnicas de diseño y fabricación digital que les permitirán diseñar, construir, y operar una granja acuapónica. Como parte del proyecto, los jóvenes desarrollarán una empresa social de nueva creación que les permitirá vender los productos de la finca a empresas locales, desarrollando así sus habilidades en emprendimiento social, negocios y marketing (www.nervecentre.org / noticias / fablab-nervio-center-launches-aquaponic-digital-farm).

Solutions for Change, una empresa social que se dedica a solucionar el problema de las familias sin hogar, administra Solutions Farms en California (www.solutionsfarm.org). La granja acuapónica brinda capaci-

Fig. 24.1 Instalaciones acuapónicas en la Asociación Huerto Lazo - en sentido antihorario desde arriba a la izquierda: tanques de peces gato en el invernadero acuapónico; tanques de tilapia con *Gynostemma pentaphyllum*, que se vende con fines medicinales; los tanques de filtración de agua de Huerto Lazo; Ulrich Eich demostrando su sistema acuapónico (Fotografías: Sarah Milliken)

tación a familias sin hogar en el cultivo de tilapia y verduras y hierbas de temporada, que luego se venden a restaurantes, mercados y escuelas locales. Funciona como un laboratorio para enseñar valores laborales importantes y preparar a las personas para el reingreso en el lugar de trabajo, lo que aumenta la esperanza y produce.

Asociacíon Huerto Lazo (www.huertolazo.eu) es una empresa social en la provincia de Málaga, España, que ofrece pasantías a jóvenes de entornos conflictivos. Los pasantes reciben formación práctica en acuaponía en un entorno seguro. El pez gato, la tilapia y la tenca se venden al restaurante El Sollo en Fuengirola (Fig. 24.1).

24.3 SEGURIDAD ALIMENTARIA Y SOBERANÍA ALIMENTARIA

La seguridad alimentaria existe cuando todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico y económico a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que satisfagan sus necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para una vida activa y saludable (Allison 2011). Hay cuatro pilares de la seguridad alimentaria, que defi nen, defienden y miden el estado de la seguridad alimentaria a nivel local, nacional e internacional.

Estos son la disponibilidad de alimentos, la accesibilidad de los alimentos, la utilización de los alimentos y la estabilidad alimentaria. La disponibilidad de alimentos se logra cuando los alimentos nutritivos están disponibles en todo momento para que las personas accedan a ellos, mientras que la accesibilidad a los alimentos se logra cuando las personas en todo momento tienen la capacidad económica para obtener alimentos nutritivos disponibles de acuerdo con sus preferencias dietéticas. La utilización de los alimentos se logra cuando todos los alimentos consumidos son absorbidos y utilizados por el cuerpo para hacer posible una vida activa y saludable, y la estabilidad alimentaria se logra cuando se logran todos los demás pilares (Faber et al. 2011).

La agricultura urbana y periurbana se reconoce cada vez más como un medio por el cual las ciudades pueden alejarse de los actuales sistemas alimentarios injustos y dependientes de los recursos, reducir su huella ecológica y aumentar su habitabilidad (van Gorcum et al.2019; Dubbeling y col. 2010).

Debido a ser casi completamente dependiente de productos importados de otras regiones, los consumidores urbanos son particularmente vulnerables a inseguridad alimentaria. Para quienes tienen un nivel socioeconómico bajo, esta dependencia significa que cualquier fluctuación en los precios de los alimentos se traduce en un poder adquisitivo limitado, mayor inseguridad alimentaria y opciones dietéticas comprometidas. Las empresas de acuaponía basadas en la comunidad ofrecen un nuevo modelo para combinar la agencia local con la innovación científica para brindar soberanía alimentaria y seguridad alimentaria, al volver a involucrar y dar a las comunidades más control sobre su producción y distribución de alimentos (Laidlaw y Magee 2016). Si se implementa como un programa para ser administrado por la población local, los sistemas acuapónicos tienen el potencial de abordar la soberanía alimentaria. A su vez, la seguridad alimentaria se ve reforzada por el consumo de pescado, que es una fuente importante de proteínas, aminoácidos esenciales y vitaminas. Incluso cuando se consume en pequeñas cantidades, el pescado puede mejorar la calidad de la dieta al aportar aminoácidos esenciales, que a menudo faltan o están subrepresentados en las dietas a base de vegetales.

La empresa social británica Byspokes Community Interest Company (CIC) estableció un sistema piloto de acuaponia y un programa de capacitación en el Centro Al-Basma en Beit Sahour, Territorios Palestinos Ocupados (OPT), una región donde la disponibilidad de espacio para la producción de alimentos es un problema grave. particularmente en las áreas urbanas y los campos de refugiados. Incluso en áreas agrícolas, el acceso a la tierra se está

perdiendo debido a los controles israelíes y a través de la anexión efectiva por parte de la "Valla de seguridad" israelí. Por lo tanto, la acuaponía ofrece una solución que ahorra agua y espacio para cultivar productos locales frescos, incluida una fuente de proteínas de alta calidad (pescado), lo que ayuda a combatir la desnutrición y la inseguridad alimentaria, al mismo tiempo que brinda nuevas oportunidades de ingresos. Generacion. El 40% de la población de los Territorios Palestinos Ocupados (25% en Cisjordania) está clasificada como "inseguridad alimentaria crónica", y el desempleo se sitúa en torno al 25%, con máximos de 80% en algunos campos de refugiados. Desde un punto de vista económico, el proyecto demostró que un sistema acuapónico podría contribuir significativamente a los ingresos de los hogares y así ayudar a sacar a las familias de la pobreza, al mismo tiempo que proporciona una variedad de verduras frescas y pescado a las familias que tienen menos posibilidades de comprar alimentos de tan alta calidad (Viladomat y Jones 2011).

Desde 2010, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha estado implementando un Proyecto de Apoyo a la Producción de Alimentos de Emergencia para familias pobres en la Franja de Gaza, donde 11 años de bloqueo israelí por mar, tierra y aire, combinado con escasas lluvias durante la sequía, han comprometido gravemente las posibilidades de producción nacional de alimentos en una de las zonas más densamente pobladas del mundo. Con tantas restricciones, las verduras frescas son caras y difíciles de encontrar. El 97% de la población de la Franja de Gaza vive en zonas urbanas o en campamentos y, por tanto, no tiene acceso a la tierra. La pobreza afecta al 53% de la población y el 39% de las familias encabezadas por mujeres padecen inseguridad alimentaria.

Permitir que las familias produzcan sus propios alimentos frescos asequibles es, por lo tanto, una respuesta muy apropiada y eficaz a la situación actual. Los hogares encabezados por mujeres que padecían inseguridad alimentaria y que vivían en zonas urbanas recibieron unidades de acuaponía en la azotea y se instalaron otras unidades en establecimientos educativos y comunitarios. Tener una unidad de acuaponia en el techo significa que las mujeres pueden mejorar simultáneamente la seguridad alimentaria y los ingresos de su hogar. sin dejar de cuidar a sus hijos y hogares. Como resultado, todos los bene fi ciarios han aumentado el consumo de alimentos de sus hogares (FAO 2016) A través de su Programa de agricultura adaptativa, INMED Partnerships for Children se dedica a establecer programas alimentarios sostenibles que mejoren la seguridad alimentaria, conserven los recursos naturales, promuevan estrategias para adaptarse al cambio climático y brinden oportunidades para la generación de ingresos en los

países en desarrollo. INMED ha desarrollado un sistema acuapónico simple y asequible para pequeños agricultores, escuelas, instituciones gubernamentales y jardineros domésticos que utilizan materiales locales disponibles y de fácil acceso. Durante la última década, INMED ha establecido un Programa de Acuicultura Adaptativa y Acuaponía de gran éxito en Sudáfrica, Jamaica y Perú. En Sudáfrica, el INMED se centra en lograr la seguridad alimentaria y la generación de ingresos sostenibles mediante el fortalecimiento de la capacidad local para comprender y abordar el cambio climático, mientras resuelve problemas interrelacionados de degradación ambiental, aumento de la escasez de agua y pobreza. Ofrece vínculos de planificación empresarial con los mercados y asistencia con las solicitudes de subvenciones para el desarrollo y préstamos para ampliar empresas. En el centro de esta visión de gran alcance, además del cultivo tradicional intensivo, se encuentra la acuaponía. Se han implementado con éxito varios proyectos en diferentes provincias del país. Se instaló un sistema acuapónico en la Asociación Cristiana Thabelo para Discapacitados en un área remota de la región de Venda en la provincia de Limpopo. Debido a que el sistema de INMED no requiere trabajo pesado ni sistemas mecánicos complejos, es ideal para personas con discapacidades y aquellas que no pueden realizar actividades agrícolas tradicionales. Desde la instalación, la cooperativa ha aumentado sus ingresos en más de un 400%. Los miembros de la cooperativa reciben salarios mensuales estables y han invertido en la cría de animales para obtener ingresos adicionales. Las comunidades que han adoptado esta nueva forma de agricultura han fortalecido su capacidad para garantizar la seguridad alimentaria y brindar oportunidades nuevas y adaptables para la generación de ingresos (https://inmed.org) (Fig. 24.2).

Otro buen ejemplo de mejora de la comunidad en Sudáfrica es Eden Aquaponics (www.edenaquaponics.co.za). Eden Aquaponics (Pty) Ltd. es la creación de Jack Probart quien, al darse cuenta de que la seguridad alimentaria se está volviendo tan vital como una economía saludable, tuvo la visión de desarrollar un negocio comercial con un enfoque comunitario. Utilizando acuaponía para producir pescado y verduras en el área de Eden de Garden Route en el Cabo Occidental, Eden Aquaponics suministra pescado para el consumo, así como alevines para la cría de peces, y cultiva una variedad de verduras orgánicas para su distribución en los mercados de agricultores locales, restaurantes y minoristas. La división Community Upliftment fabrica e instala sistemas comerciales personalizados de varios tamaños, incluidos equipos acuapónicos de bricolaje en el patio trasero, y suministra plántulas y alevines.

También enseñan a las comunidades menos afortunadas a ser autosuficientes en el cultivo, la comercialización y la venta de sus productos, lo que

permite a las personas que anteriormente estaban desempleadas desarrollar habilidades, confianza en sí mismas, autoestima y la capacidad de mantenerse por sí mismas.

Food Basket for Africa (www.foodbasketforafrica.org.za) es una iniciativa similar. Se centran en el trabajo de desarrollo de los hombres, que se realiza a través de la Fraternidad de Hombres, proporcionando asesoramiento social y emocional a los hombres de las zonas rurales. Men's Fraternity trabaja en asociación con Effective Living Centers, una organización de asesoramiento de renombre. Food Basket for Africa lleva a cabo una serie de proyectos de desarrollo agrícola en zonas rurales del sur de África. Túneles de alimentos (no hidropónicos pero principalmente camas absorbentes) se colocan en las comunidades, que las adoptan, y se imparte formación inicial en técnicas de riego y fertilización para el cuidado de túneles. Se encargó un sistema acuapónico en uno de los proyectos, en Kommetjie, Ciudad del Cabo.

Las cuestiones de seguridad alimentaria y soberanía alimentaria no solo son pertinentes para el mundo en desarrollo. En Sevilla, España, la empresa social Asociación Verdes del Sur ha instalado un invernadero acuapónico en los terrenos de una escuela en el Polígono Sur, la zona más desfavoreci-

Fig. 24.2 Algunas ilustraciones de los proyectos comunitarios de INMED en Sudáfrica. (Fotografías proporcionadas por Janet Ogilvie de INMED)

Fig. 24.3 Instalaciones acuapónicas en Polígono Sur - en sentido antihorario desde arriba a la izquierda: invernadero acuapónico de la escuela; Soledad con una tilapia congelada criada en su unidad doméstica; tomates y una berenjena guardados para sus semillas; la unidad de acuaponia doméstica. (Fotografías: Sarah Milliken).

da socialmente de la ciudad que se caracteriza por el desempleo de larga duración y una alta incidencia de delitos relacionados con las drogas. La unidad de acuaponia se utiliza como parte de un programa de educación ambiental para los residentes locales, que incluye enseñar los beneficios de comer alimentos frescos cultivados localmente y desarrollar habilidades para los desempleados (http://huertosverdesdelsur.blogspot.com). También se ha instalado un prototipo de unidad doméstica en la casa de uno de los vecinos, Soledad (Fig.24.3).

El Well Community Allotment Group (Crookes Community Farm) es una empresa social dirigida por voluntarios en Sheffield, Reino Unido, que tiene la misión de conectar a la comunidad local con sus alimentos involucrándolos activamente en su producción y educándolos sobre los beneficios. de comida local. En 2018, la asociación recibió un premio del Fondo Comunitario Aviva para construir una unidad de acuaponía que se utilizará para educar a individuos, escuelas, grupos de jóvenes y otras organizaciones (https://www.avivacommunityfund.co.uk/voting/proyecto/pastwinnerprojectview/17-6291).

En los Estados Unidos, se han establecido varias empresas sociales que utilizan sistemas acuapónicos en todo el país como parte de un creciente movimiento social que se centra en el uso de la agricultura urbana para aumentar la seguridad alimentaria y la cohesión comunitaria. Uno de los primeros fue Growing Power, que fue fundada por Will Allen en 1995, con el objetivo de utilizar la agricultura urbana como vehículo para mejorar la seguridad alimentaria en el centro de Milwaukee y para el fortalecimiento a largo plazo de sus vecindarios, y brindar los jóvenes de la ciudad una oportunidad de adquirir habilidades para la vida cultivando y comercializando productos orgánicos. Growing Power proporcionó instalaciones o tierras, orientación en el cultivo de alimentos y el mantenimiento general del proyecto, y los productos se donaron a programas de comidas y proveedores de alimentos de emergencia o los jóvenes los vendieron en tiendas agrícolas locales y mercados de agricultores, con la estipulación de que uno- la cuarta parte de las ganancias se devolverá a la comunidad local (Kaufman y Bailkey 2000). Según todos los informes, Growing Power estaba haciendo exactamente lo que se habían propuesto hacer: estaban alimentando, capacitando y exponiendo a miles de personas a una relación más autónoma con su comida. Pero mientras se cumplía su misión, conllevaba costos significativos. Salía más dinero que entraba por las puertas de Growing Power y, en 2014, la empresa social tenía una deuda de más de 2 millones de dólares (Satterfield 2018). Enfrentada a una deuda insuperable y una presión legal, Growing Power finalmente se disolvió en 2017. Sin embargo, el legado de la empresa sigue vivo en forma de otros emprendimientos sociales que se inspiraron para iniciar iniciativas similares. Una de esas empresas que reconoce la influencia de Will Allen es Rid-All Green Partnership en Cleveland, Ohio, cuya misión es educar a la próxima generación para que no solo aprendan a cultivar y comer alimentos frescos, sino también a operar y hacer crecer sus propios negocios en la industria alimentaria. industria, que van desde la venta de productos frescos y pescado a los distribuidores de alimentos hasta el procesamiento y envasado de productos alimenticios frescos (https://www.greennghetto.org).

El movimiento de agricultura urbana en los Estados Unidos ha sido impulsado por el programa de subvenciones competitivas del Proyecto de Alimentos Comunitarios (CFP) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que se estableció en 1996 con el objetivo de combatir la inseguridad alimentaria mediante el desarrollo de proyectos alimentarios comunitarios que promover la autosuficiencia de las comunidades de bajos ingresos. Desde 1996, este programa ha otorgado aproximadamente $ 90 millones en subvenciones. Una empresa social que se ha beneficiado de este esquema es Planting Justice (www.plantingjusti-

ce.org), que construyó un sistema acuapónico en un terreno baldío en East Oakland, California, que está dirigido por ex reclusos. Se han creado doce empleos con salarios dignos, se han entregado 5000 libras (2268 kilos) de productos agrícolas gratuitos a la comunidad y el proyecto ha devuelto $ 500,000 en salarios y $ 200,000 en beneficios al vecindario (New Entry Sustainable Farming Project 2018). GrowHaus (https://www.thegrowhaus.org) se fundó en 2009 como una empresa social, que se centra en la producción comunitaria de alimentos saludable, equitativa e impulsada por los residentes; El 97% de los alimentos consumidos en Colorado se producen fuera del estado, y el vecindario donde se encuentra The GrowHaus ha sido designado como un "desierto de alimentos" en función de las características de bajos ingresos, raza / etnia, larga distancia a una tienda de comestibles, falta de acceso a alimentos frescos y asequibles y dependencia del transporte público. Los residentes han llegado a depender de la comida rápida, las tiendas de conveniencia, las estaciones de servicio y los bancos de alimentos para la mayoría de sus alimentos básicos. Debido a estos factores, muchas personas enfrentan desafíos importantes en términos de seguridad alimentaria y acceso, lo que resulta en un aumento dramático en los problemas de salud relacionados. Inicialmente en asociación con Colorado Aquaponics (www.coloradoaquaponics.com), y desde 2016 de forma independiente, GrowHaus opera una granja acuapónica de 3200 pies cuadrados (297 metros cuadrados), y los productos se venden a través de un programa semanal de canastas de alimentos frescos de la granja en un precio comparable al de Walmart, así como a los restaurantes, con una parte donada a la comunidad local. Para ayudar en la transición hacia una alimentación más saludable, GrowHaus también organiza eventos comunitarios y de capacitación gratuitos centrados en la comida. En el En el año fiscal 2016–2017, GrowHaus generó un ingreso de $ 1,204,070, de los cuales $ 333,534 fueron ingresos del trabajo y $ 870,536 se recaudaron a través de subvenciones gubernamentales, fundaciones benéficas, contribuciones corporativas y donaciones individuales. Con costos operativos de $ 934,231, el ingreso anual neto fue de $ 269,839 (https://www.thegrowhaus.org/annual-report).

Trifecta Ecosystems (anteriormente Fresh Farm Aquaponics; (http://trifectaecosystems.com) fue fundada en 2012 en Meriden, Connecticut. Su misión es abordar la seguridad alimentaria urbana mediante la creación de incentivos para que las comunidades cultiven sus propios alimentos y, al mismo tiempo, crear conciencia sobre la agricultura sostenible a través de la educación, los talleres y los proyectos urbanos. La empresa emplea a seis personas que proporcionan sistemas acuapónicos a organizaciones con fines educativos, desarrollo de la fuerza laboral, jardinería terapéutica y producción de alimentos de alta calidad. Los

sistemas acuapónicos van desde instalaciones de producción a escala comercial hasta pequeñas unidades educativas para su uso en las aulas. En 2018, la Autoridad del Agua de la Región Centro Sur (RWA) otorgó una subvención de $ 500,000 para facilitar la creación de una serie de sistemas acuapónicos de agricultura ambiental controlada a medida, una plataforma tecnológica de agricultura urbana y programas de capacitación de la fuerza laboral destinados a mejorar la seguridad alimentaria.

La empresa social SchoolGrown (www.schoolgrown.org) fue establecida en 2014 por entusiastas de la acuaponia que sentían que los niños no estaban obteniendo suficientes experiencias prácticas cultivando alimentos y aprendiendo sobre su conexión con el mundo que los rodeaba. Situado junto a la operación comercial de acuaponía en Ouroboros Farms, California, el "aula" de acuaponía está a cargo de voluntarios y se utiliza para proporcionar capacitación. Su enfoque principal, sin embargo, es difundir los sistemas acuapónicos a las escuelas y comunidades de los Estados Unidos para enseñar prácticas agrícolas sostenibles, administración ambiental y conservación de recursos, y al mismo tiempo producir alimentos frescos y locales, construyendo así una conexión más profunda. entre las comunidades y los alimentos que comen.

El LEAF (Living Ecosystem Aquaponic Facility) es un invernadero de 167 metros cuadrados (1800 pies cuadrados) con un sistema acuapónico de energía solar que fue diseñado específicamente para este propósito. Con un costo de $ 75,000, que incluye los salarios de dos empleados a tiempo parcial responsables del mantenimiento del sistema y la cosecha, los invernaderos están financiados por una combinación de un esquema de caja de vegetales de Agricultura Apoyada por la Comunidad (CSA), patrocinio de la comunidad local o de negocios y financiamiento colectivo. Cada LEAF está destinado a ser financieramente autosuficiente a través de la generación de ingresos a partir del producto.

24.4 LA VIABILIDAD DE LAS EMPRESAS SOCIALES DE ACUAPONÍA.

Los ejemplos anteriores ilustran algunos de los diferentes modelos comerciales adoptados por las empresas sociales de acuaponía. Queda por ver si continuarán prosperando y creciendo o, como Growing Power, finalmente fracasarán. En el caso de Growing Power, las posibles razones de su colapso incluyen la incapacidad de Will Allen para empoderar y retener un equipo de gestión operativa, y la falta de supervisión por parte de los miembros de la junta, lo que comprometió la salud financiera de la organización (Satterfield 2018). Un análisis en profundidad de dos

empresas sociales de acuaponía realizado en 2012-2013 reveló cuatro factores distintos que fueron significativos para su supervivencia (Laidlaw y Magee 2016). Sweet Water Organics (SWO) comenzó como una granja acuapónica urbana en un gran edificio industrial del centro de la ciudad en desuso en Milwaukee en 2008. Fue financiado principalmente por sus fundadores para desarrollar la capacidad creativa, oportunidades de empleo y productos químicos frescos, y comida asequible para la comunidad local. En 2010, una nueva organización, Sweet Water Farms (SWF), se separó de SWO, con la idea de que crecerían como una organización híbrida cohesiva y de apoyo mutuo, incluyendo tanto una granja urbana comercial con fines de lucro (SWO) como una granja sin fines de lucro. –Academia de acuaponia con fines de lucro (SWF). SWF gestionó operaciones de voluntariado y organizó programas de formación y educación en la granja urbana Sweet Water, mientras desarrollaba programas a escala local (Milwaukee y Chicago), regional, nacional e internacional. Dulce Water tenía seguidores leales entre los restauradores locales y las tiendas de alimentos frescos por sus productos de lechuga y brotes, y vendía su pescado a un solo mayorista. Sin embargo, el modelo de empresa híbrido sin fines de lucro / con fines de lucro resultó ser un desafío, ya que ambos lados de la organización lucharon por identificar su papel en relación con el otro. Si bien cada lado tenía una estructura diferente en relación con su carácter operativo, y aunque sus operaciones con frecuencia se superponían, su planificación estratégica y sus visiones a veces no. Después de 3 años de funcionamiento, SWO todavía no había logrado generar ganancias, y en 2011 el gobierno municipal de Milwaukee otorgó un préstamo de $ 250,000 con la condición de que se crearían 45 empleos para 2014. En octubre de 2012, SWO había11–13 empleados permanentes, pero aún se mantenía mediante el financiamiento de préstamos y la inversión de capital. En junio de 2013, cuando vencieron los reembolsos de los préstamos y no se cumplieron los objetivos de creación de empleo, la rama lucrativa de Sweet Water entró en liquidación y SWF asumió el cargo de operador principal de la granja urbana Sweet Water. Actualmente, SWF opera completamente como una empresa educativa y de asesoría dirigida por voluntarios y un pequeño equipo de empleados a tiempo parcial, y ya no suministra productos a los restaurantes (Laidlaw y Magee 2016).

El Centro de Educación e Investigación (CERES) en Melbourne, Australia, abrió sus instalaciones de acuaponía en 2010. El sistema fue diseñado como un sistema comercial suboptimizado con la capacidad de producción para soportar un salario único para el agricultor que lo mantiene. Este salario varía según la cantidad que produce, y las verduras se venden a través del servicio de entrega de cajas orgánicas CERES Fair Food. La escala de la operación no genera un retorno que permita la instalación de una planta

procesadora de pescado. Las partes interesadas de Sweet Water Farms y CERES identificaron que el factor principal detrás de su supervivencia era el compromiso continuo, en forma de apoyo continuo del personal con habilidades técnicas y de gestión empresarial combinado con un liderazgo duradero y la voluntad de las partes interesadas de seguir participando. y dispuestos a cooperar sin fuertes incentivos financieros. El segundo factor fue el contexto político local. Si bien la ciudad de Milwaukee apoyó a Sweet Water tanto a través de iniciativas políticas como de ayuda financiera directa, lo que le permitió expandir sus activos fijos y recursos humanos, crear conciencia del mercado y adquirir una base de clientes comerciales regulares considerable, el proyecto CERES tuvo poco apoyo, más allá de una subvención inicial, y había tenido problemas para generar ingresos, lo que le habría permitido expandirse. Los costos de cumplimiento y concesión de licencias también dificultaron la interacción con los mercados locales de una manera más que simbólica, lo que disminuyó su motivación para comercializar y vender el producto, e hizo insostenible que la operación se desarrollara más allá de una pequeña generación de ingresos a tiempo parcial. enterprise. The third factor was the availability of markets for urban aquaponics produce. While urban aquaponics is attractive to a customer base that is increasingly responsive to issues of food security and ethical consumption, such as in Milwaukee, this was not the case in Melbourne. The final factor was diversification. Both CERES and SWO/SWF benefitted from translating social and technical experimentation into a range of training and educational services. SWO/SWF, being a larger concern, obviously had greater capacity for developing these services, and these proved vital in sustaining the social enterprise when commercial plans failed to materialize (Laidlaw and Magee 2016).

24.5 CONCLUSIONES

En "Diez tecnologías que podrían cambiar nuestras vidas" (Servicio de Investigación del Parlamento Europeo, 2015), los sistemas acuapónicos se destacaron como una solución para desarrollar fuentes de alimentos innovadoras y sostenibles para Europa que, mediante el acortamiento de las cadenas de suministro, podrían mejorar la seguridad alimentaria y la alimentación. resiliencia de los sistemas. Sin embargo, la tecnología aún está surgiendo recientemente y aún está relativamente poco desarrollada, y como destaca el estudio de Laidlaw y Magee (2016), la viabilidad de una empresa social de acuaponía depende no solo del compromiso de las partes interesadas, un análisis de mercado exhaustivo, estructuras de gobierno claras y un plan de negocios sólido, sino también sobre factores externos, como el contexto político local y las regulaciones.

REFERENCIAS

Allison EH (2011) Aquaculture, fisheries, poverty and food security. Security 61

Diamant E, Waterhouse A (2010) Gardening and belonging: reflections on how social and thera- peutic horticulture may facilitate health, wellbeing and inclusion. Br J Occup Ther 73(2):84–88. https://doi.org/10.4276/030802210X12658062793924

Drangert JO (1998) Fighting the urine blindness to provide more sanitation options. Water SA 24:157–164

Dubbeling M, de Zeeuw H, van Veenhuizen R (2010) Cities, poverty and food: multi- stakeholder policy and planning in urban agriculture. Practical Action Publishing Ltd., Colchester

European Parliamentary Research Service (2015) Ten technologies which could change our lives: Potential impacts and policy implications. http://www.europarl.europa.eu/EPRS/EPRS_IDAN_527417_ten_trends_to_change_your_life.pdf

Faber M, Witten C, Drimie S (2011) Community-based agricultural interventions in the context of food and nutrition secugrity in South Africa. S Afr J Clin Nutr 24:21–30

FAO (2016) Urban agriculture in the Gaza Strip through vertical gardens and aquaponics. Food and Agriculture Organization of the Unuted Nations, Rome. http://www.fao.org/fileadmin/templates/FCIT/PDF/Fact_sheet_on_aquaponics_Final.pdf

Fasciglione M (2015) Corporate social responsibility and the right to employment of persons with disabilities. In: Fina VD, Cera R (eds) Protecting the Rights of People with Autism in the Fields of Education and Employment. Springer, Cham, pp 171–193. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13791-9_7

Fieldhouse J (2003) The impact of an allotment group on mental health clients' health, wellbeing and social networking. Br J Occup Ther 66(7):286–296

Howarth ML, McQuarrie C, Withnell N, Smith E (2016) The influence of therapeutic horticulture on social integration. J Public Ment Health 15(3):136–140. https://doi.org/10.1108/JPMH-12-2015-0050

Kaufman J, Bailkey M (2000) Farming inside cities: entrepreneurial urban agriculture in the United States. Lincoln Institute of Land Policy working paper. http://www.urbantilth.org/wp-content/uploads/2008/10/farminginsidecities.pdf

Laidlaw J, Magee L (2016) Towards urban food sovereignty: the trials and tribulations of community-based aquaponics enterprises in Milwaukee and Melbourne. Local Environ 21 (5):573–590. https://doi.org/10.1080/13549839.2014.986716

New Entry Sustainable Farming Project (2018) Community food projects: indicators of success FY 2017. https://nesfp.org/sites/default/files/uploads/ios_2017_final_draft_april_13_2018.pdf

Satterfield S (2018) Behind the rise and fall of Growing Power. Public Radio International, March 2018. https://www.pri.org/stories/2018-03-16/behind-rise-and-fall-growing-power

Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A (2014) Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO fisheries and aquaculture technical paper no. 589. FAO, Rome

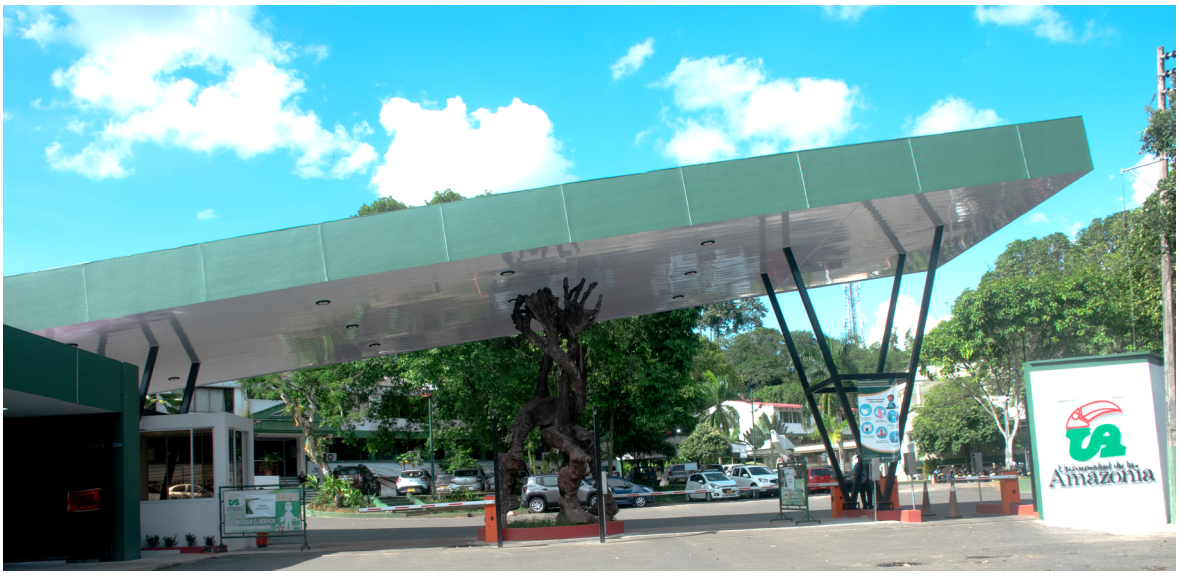
van Gorcum et al (2019) https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-019-00379-1

Viladomat L, Jones P (2011) Development of aquaponic systems for space and water efficient food production in the Occupied Palestinian Territories – Pilot project final report. http://www. byspokes.org/wp-content/uploads/documents/basma_report.pdf

Acceso abierto. Este capítulo tiene licencia bajo los términos de Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso, el intercambio, la adaptación, la distribución y la reproducción en cualquier medio o formato, siempre que otorgue el crédito correspondiente al autor original. y la fuente, proporcionar un enlace a la licencia Creative Commons e indicar si se realizaron cambios.

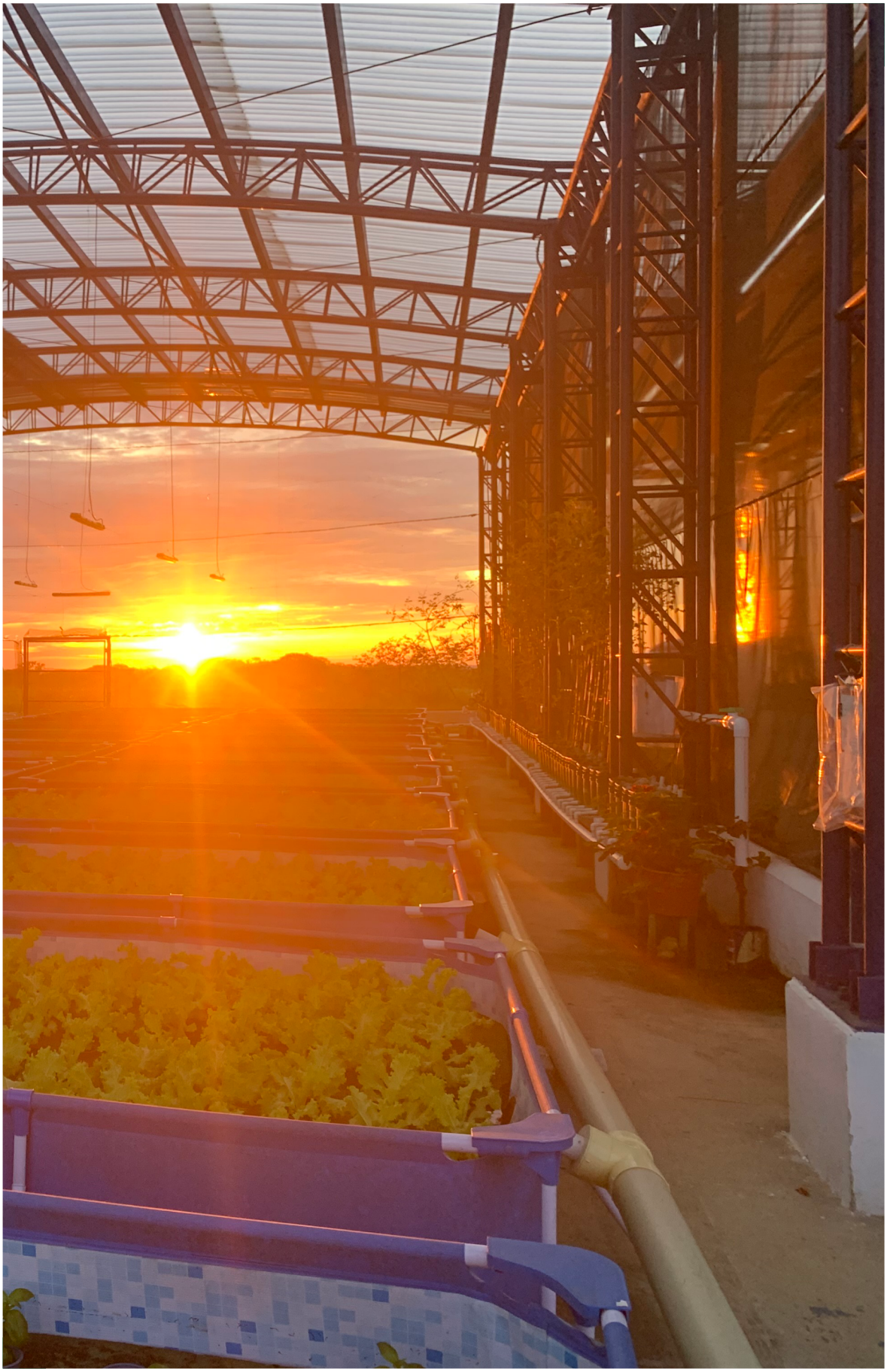
Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del capítulo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito del material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del capítulo y el uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener el permiso directamente del titular de los derechos de autor.

UNIVERSIDAD DE LA AMAZONIA



Acceso vehicular sede principal
Auditorio Ángel Cuniberti
Monumento a la Paz.
División biblioteca e información científica

2



3

CAMAS
ACUAPONICAS

22
10

PRODUCTO
ORGÁNICO
100% CAQUETEÑO
CEL:320 809 01 71
ACUICA

PRODUCTO
ORGÁNICO
100% CAQUETEÑO
1

2

4

3

Lechuga
Fresco
7

5

6

ALBACA
20/01/22