

SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA ACUICULTURA

**MANUAL DE CONOCIMIENTOS
GENERALES**



Universidad de
La Sabana

FACULTAD DE INGENIERÍA



UniSabana
Editorial

UnisabanaHUB

Transferencia • Emprendimiento • Innovación

García Hernández, Nicolás, autor

Sistemas de recirculación para acuicultura: Manual de conocimientos generales / Nicolás García Hernández... [y otros siete]. -- Chía: Universidad de La Sabana, SENA, Minciencias, 2025.

24 páginas; cm.

Incluye bibliografía

ISSN 3028-7022

1. Acuicultura 2. Producción animal 3. Maricultura I. García Hernández, Nicolás II. Universidad de La Sabana III. SENA IV. Minciencias (Colombia). IV. Tit.

CDD 639.8

CO-ChULS

Sistemas de recirculación para acuicultura.

Manual de conocimientos generales

© UniSabana Editorial, Chía, 2025

© Nicolás García Hernández

© Luisa Marcela Villamil Díaz

© Stephania Aragón Rojas

© Marcelo Fernando Valle Vargas

© Carlos Daniel Montes Rodríguez

© Martha Isabel Cobo Ángel

© Ruth Elena Hernández Benítez

© Ender David Egurrola Pedraza

Entidades participantes

Universidad de La Sabana

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)

Ministerio de Ciencia, Tecnología

e Innovación (Minciencias)

Sistema General de Regalías

Serie Arcus

ISSN 3028-7022

DOI: <https://doi.org/10.5294/Arcus.2025.3>

Primera edición: abril, 2025

300 ejemplares impresos

Edición

UniSabana Editorial

Dirección de Publicaciones y

Divulgación Científica

publicaciones@unisabana.edu.co

TEL: (601) 8615555 Ext 45101

Universidad de La Sabana

Diagramación y montaje de cubierta

Juan Pablo Rátiva González

Corrección de estilo

María José Díaz Granados M.

Impresión

Imageprinting Ltda.

Este producto es derivado del proyecto

“Implementación de herramientas

biotecnológicas y sistemas de recirculación

para lograr la sostenibilidad del

cultivo de tilapia como estrategia

productiva para la seguridad e

inocuidad alimentaria” (COD BPIN:

2020000100487), financiado con recursos

del Sistema General de Regalías.

Proyecto gestionado por:

Grupo de investigación de la

Universidad de La Sabana

Procesos Agroindustriales (GIPA)

La Editorial UniSabana se adhiere a la iniciativa de acceso abierto y permite libremente la consulta, descarga, reproducción o enlace para uso de sus contenidos, bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN PARA ACUICULTURA

MANUAL DE CONOCIMIENTOS GENERALES

Nicolás García Hernández
Luisa Marcela Villamil Díaz
Stephania Aragón Rojas
Marcelo Fernando Valle Vargas
Carlos Daniel Montes Rodríguez
Martha Isabel Cobo Ángel
Ruth Elena Hernández Benítez
Ender David Egurrola Pedraza

Universidad de La Sabana
Servicio Nacional de Aprendizaje
(SENA)
Ministerio de Ciencia, Tecnología e
Innovación (Minciencias)
Sistema General de Regalías

8

Introducción

11

Contexto de la acuicultura

¿Qué es la acuicultura?	10
Estado mundial	10
Impactos de la acuicultura	14

21

Funcionamiento y partes de los sistemas RAS

¿Qué es un sistema RAS?	20
Componentes del sistema	22
Tanques	22
Sistema de filtración mecánica	25
Biofiltro	32
Desinfección	42
Sistema de oxigenación	45
Consideraciones adicionales	48

51

Uso de sistemas RAS

Alternativas de siembra y cultivo de peces en un sistema RAS	50
Guía de siembra	50
Alimentación	53
Ajuste de la alimentación según la etapa de crecimiento	54
Recomendaciones	55

Calidad del agua	55
Temperatura	55
pH	56
Oxígeno disuelto (OD)	56
Amoníaco (NH ₃) y Nitrógeno	
Amoniaco Total (NAT)	56
Nitritos (NO ₂ ⁻)	57
Nitratos (NO ₃ ⁻)	57
Alcalinidad	57
Posibles emergencias	59
Acumulación de amoníaco	59
Falla eléctrica	61
Emergencias relacionadas con	
el agua del sistema	63
Consideraciones adicionales	64

68

Prospectivas

Retos de la acuicultura	67
Digitalización	67
Innovaciones tecnológicas	70
Modelado y control de los	
sistemas RAS	71

78

Conclusiones

80

Referencias

INTRODUCCIÓN

Esta cartilla está diseñada como una guía práctica y accesible para productores y técnicos interesados en la implementación y optimización de sistemas de recirculación acuícola (RAS - Recirculation Aquaculture Systems). A lo largo de sus capítulos se presenta una visión integral que abarca desde los fundamentos de la acuicultura hasta aplicaciones avanzadas de modelado y control automatizado. Esta guía no solo se enfoca en explicar el funcionamiento técnico de los sistemas RAS, también ofrece una perspectiva con miras al futuro, destacando la importancia de avanzar hacia una acuicultura más eficiente, automatizada y ambientalmente sostenible.

Los sistemas RAS constituyen una tecnología innovadora, que permite el cultivo de especies acuáticas en un entorno controlado, optimizando el uso del agua y reduciendo significativamente su consumo en comparación con los métodos tradicionales. Estos sistemas sobresalen por su capacidad de regular parámetros fisicoquímicos, incrementar la bioseguridad y reducir el impacto ambiental. A través de procesos de filtración, sedimentación, desinfección y oxigenación, el agua es tratada y reutilizada eficientemente, cerrando un ciclo sostenible que respalda el cultivo intensivo de especies como la tilapia.

La adopción de estos sistemas está en constante crecimiento debido a sus beneficios ambientales y sanitarios; sin embargo, también plantea desafíos relacionados con los costos de instalación y operación. El avance en tecnologías como la automatiza-

ción, el análisis de datos y la inteligencia artificial (IA) promete superar estas barreras, mejorando la eficiencia y viabilidad económica de los RAS. Este documento busca proporcionar las herramientas necesarias para que productores y técnicos puedan implementar estas soluciones, optimizando sus procesos productivos y contribuyendo al desarrollo de una acuicultura sostenible en el país.

CONTEXTO DE LA ACUICULTURA

¿Qué es la acuicultura?

La acuicultura es una actividad que consiste en la crianza de organismos acuáticos como peces, crustáceos, moluscos y algas en entornos controlados, tales como estanques, jaulas o tanques, con el propósito de producir alimentos, productos farmacéuticos y otros bienes de interés comercial. Esta es una de las industrias de mayor crecimiento a nivel mundial para la producción de proteína (Albrektzen et al., 2022), y se presenta como una alternativa a la pesca tradicional, que puede tener efectos perjudiciales y no sostenibles en los ecosistemas acuáticos (FAO, 2024).

Estado mundial

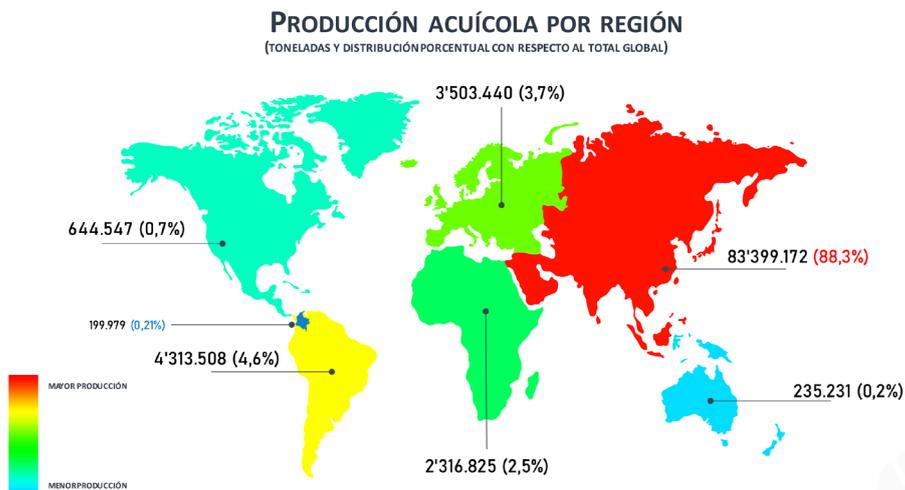
De la actividad acuícola mundial, la acuicultura aportó el 51% a la producción total de peces y mariscos a nivel global en 2022. Con una producción de 94,4 millones de toneladas, este sector experimentó un aumento del 19% entre 2000 y 2022, y se proyecta para superar los 100 millones de toneladas para 2027. De estas cifras, alrededor del 62% está concentrado en la acuicultura continental, siendo los peces de aleta los más cultivados, con cerca del 90%. Dentro de estos se destacan principalmente la carpa herbívora (6,2 millones de toneladas), la tilapia (5,3 millones de toneladas), la carpa plateada (5,1 millones de toneladas) y la anchoveta (4,9 millones de toneladas) (FAO, 2024). Estas especies son de gran importancia debido a que son resistentes, con una carne de calidad y de

rápido crecimiento como en el caso de la tilapia, lo que permite una producción en poco tiempo, con un gran potencial económico (Leonard y Skov, 2022).

Dentro de la producción mundial de peces, Asia posee el 88%, mientras que América Latina genera el 4,6% a nivel mundial. En la industria acuícola de Latinoamérica se evidenció un avance debido a que la producción acuícola de esta región aumentó en un 7% en comparación con el año 2010 (FAO, 2024). Por ende, el alto crecimiento y participación de América Latina demuestra el potencial de la región para la producción acuícola; los países con mayor crecimiento en el año 2022 con respecto al año 2020 fueron Ecuador (348.400 ton), Brasil (108.000 ton), Colombia (25.600 ton) y Chile (22.700 ton) en un 71,4, 22,1, 5,2 y 4,6% respectivamente. Si bien el crecimiento a nivel mundial es constante, China genera el 56,01% de la producción acuícola mundial, en comparación con Colombia que aporta un 0,21% (Figura 1).

Desde mediados del siglo XX, China se ha consolidado como el principal productor mundial de productos acuícolas, destacándose en la producción de tilapia, camarones, moluscos bivalvos y pescado blanco procesado. Sin embargo, este crecimiento acelerado, basado inicialmente en sistemas tradicionales como estanques y jaulas, generó importantes desafíos ambientales y sanitarios. La propagación de enfermedades, la contaminación del agua y los problemas de seguridad alimentaria

Figura 1. Producción mundial de acuicultura



Fuente: adaptado de FAO (2024).

llevaron al gobierno chino a implementar políticas que promovieran prácticas acuícolas más sostenibles (Cao et al., 2007; Liu et al., 2017).

A partir de 1980, China comenzó a incorporar sistemas RAS, aunque su adopción generalizada no se dio sino hasta finales del siglo XX. Esta transición fue impulsada por factores económicos, como la demanda de mercados internacionales por productos acuícolas más sostenibles, y la necesidad de reducir el impacto ambiental del cultivo extensivo. En el siglo XXI, el modelo de sistemas cerrados de acuicultura en recirculación se convirtió en una prioridad a nivel nacional, apoyado por avances tecnológicos que permitieron una mayor eficiencia económica y la reducción de emisiones, en concor-

dancia con los objetivos globales de ahorro energético y protección ambiental (Chen y Gao, 2023). La adopción de sistemas recirculantes no solo ha mitigado el impacto ambiental, también ha mejorado la competitividad de los productos acuícolas chinos al alinearse con las crecientes demandas de los consumidores que requieren alimentos libres de contaminantes. Este enfoque sostenible y de innovación tecnológica establece un modelo por seguir para otros países que enfrentan desafíos similares en sus industrias acuícolas (Lam et al., 2013).

Por otro lado, en Colombia, la acuicultura ha crecido un promedio de 10% anual durante la última década (Minagricultura, 2021), pasando de 80.609 toneladas en 2012 a 202.000 en 2023 (AUNAP, 2024), lo que demuestra un gran potencial y una oportunidad de mejora económica a nivel nacional. En el año 2022, el departamento con mayor producción fue el Huila (37%), seguido de Meta (11%), Tolima (9%), Cundinamarca y Boyacá (6%), Antioquia (4%), Córdoba (3%) y otros departamentos (30%). A nivel nacional, las especies más cultivadas son tilapia (58%), cachama (19%), trucha (16%) y otras especies (7%) (Fedeacua, 2023). La producción acuícola del año 2023 representó exportaciones por un valor de 134,2 millones de dólares, y generó cerca de 64.349 empleos directos y 193.047 empleos indirectos (Piza Jerez, 2024).

Debido al potencial que presenta la acuicultura a nivel nacional, se han establecido iniciativas como

el proyecto “Implementación de herramientas biotecnológicas y sistemas de recirculación para lograr la sostenibilidad del cultivo en La Guajira”. En este proyecto, la Universidad de La Sabana, en alianza con el SENA, ha instalado un sistema RAS en Riohacha, con una capacidad productiva de 2,5 toneladas de tilapia por semestre, y ha mejorado un sistema previamente existente en Fonseca. Estos esfuerzos buscan no solo mejorar la seguridad alimentaria de la región, sino también capacitar a técnicos especializados en estas tecnologías, fortaleciendo así la capacidad local para gestionar sistemas acuícolas sostenibles. El conocimiento y las destrezas que puede desarrollar la comunidad acuícola a partir de estas experiencias pioneras en sistemas de recirculación, aportarán herramientas estratégicas para el avance de la acuicultura tecnificada y de precisión en Colombia, para procurar la seguridad y la inocuidad alimentarias y el crecimiento del aporte económico para el bienestar social.

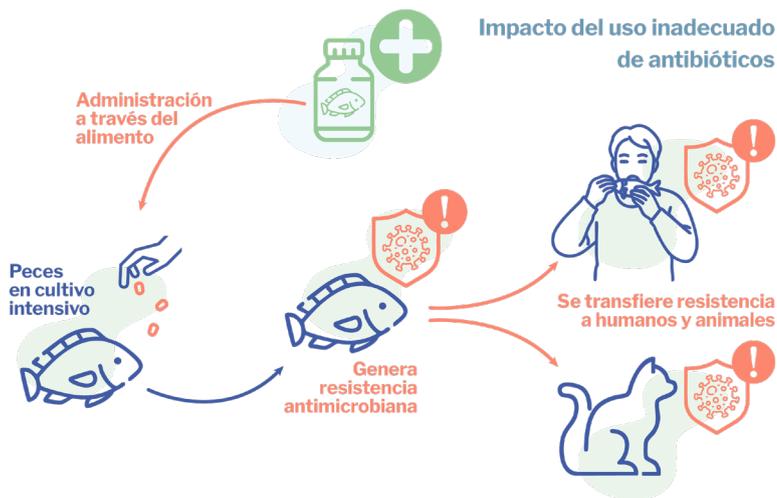
Impactos de la acuicultura

El alto crecimiento en la industria acuícola y el consecuente aumento en el uso del recurso hídrico plantean desafíos ambientales que requieren una cuidadosa consideración. Esto debido a que las fuentes hídricas se ven afectadas por la contaminación derivada de la sobrepoblación y sobrealimentación de estanques piscícolas y jaulones en sistemas abiertos, lo que genera desechos y cargas elevadas de materia orgánica que impac-

tan negativamente la calidad del agua y disminuyen la concentración de oxígeno disuelto (Ahmed et al., 2019). Así mismo, los cultivos acuícolas en jaulas abiertas liberan nutrientes y químicos sin tratamiento, como es el caso de los antibióticos, los cuales se usan ocasionalmente para combatir brotes patógenos (Milijasevic et al., 2024). Sin embargo, a pesar de los beneficios que conllevan, el uso de antibióticos en la acuicultura a menudo se ve afectado por prácticas inadecuadas, derivadas de la falta de información, principalmente debido a que al administrarse a través del alimento estos compuestos pueden ingresar al entorno mediante los desechos fisiológicos de los peces y los restos no consumidos de la alimentación (Figura 2) (Mithuna et al., 2024; Suyamud et al., 2024).

De la misma manera, entre las diversas estrategias de producción acuícola, los sistemas abiertos están expuestos a condiciones ambientales que pueden ser desafiantes, estos cambios en el ecosistema pueden derivar en grandes pérdidas para los productores. Por ejemplo, en el año 2023, en Colombia se dio una mortalidad masiva de tilapia relacionada con *Streptococcus agalactiae* la, patógeno que afectó a granjas productoras de tilapia, con una tasa de mortalidad de 12% (4.554.598 ton) en el Huila, 47% (1.621.665 ton) en Atlántico, 37% (10.301 ton) en Magdalena y 10% (50.000 ton) en Tolima (Fedeaqua, 2023), que generó pérdidas estimadas de \$15.000 millones COP (Portafolio, 2023). La aparición y propagación de patógenos se deben

Figura 2. Impacto del cultivo intensivo en jaulas



Impacto del cultivo intensivo en jaulas

Fuente: elaboración propia, creado con BioRender.

a bajos niveles de calidad del agua, como una concentración alta de amonio, un incremento del pH y una disminución en los niveles de oxígeno disuelto, así como al aumento de la temperatura del agua relacionado con el calentamiento climático y otros fenómenos globales.

Debido a esto, se requiere la implementación de un enfoque de producción más sostenible y que se encuentre en concordancia con la meta de producción azul dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente del objetivo n.º 6: agua limpia y saneamiento, y el n.º 12: producción y consumo responsables. Este cambio debe darse

de manera paulatina y con políticas públicas que apoyen la labor de los productores piscícolas.

Dentro de los sistemas de producción alternativos se encuentran los siguientes:

- Acuaponía: es un método de cultivo que integra la producción de peces con la hidroponía, que consiste en el cultivo de plantas sin suelo, lo que permite producir simultáneamente alimentos de origen vegetal y animal (Ibrahim et al., 2023). Este sistema reduce el consumo de agua y disminuye el uso de fertilizantes, ya que los desechos producidos por los peces se aprovechan como nutrientes para las plantas. A su vez, las plantas contribuyen a limpiar el agua para los peces, creando un ciclo sostenible y beneficioso para ambas producciones (Maucieri et al., 2018).
- Biofloc: esta tecnología emplea microorganismos beneficiosos que transforman el amonio y los nitritos producidos por los residuos de alimento y los desechos de los peces. Este proceso de autonitrificación no solo mantiene la calidad del agua, sino que también produce microorganismos adicionales que sirven como alimento para los peces. Gracias a este ciclo, la tecnología permite mantener una buena calidad del agua sin necesidad de intercambio, promoviendo un sistema sostenible y autosuficiente para el cultivo (Yu et al., 2023).
- IPRS: los sistemas de Raceways en estanques (IPRS - In Pond Raceway System) consisten en carriles rectangulares, que pueden ser flotantes o fijados al fondo del tanque, los cuales se instalan en estanques de tierra. Estos canales están equipados con un sistema de intercambio de agua y aireación conocido como Unidad de Agua Blanca (WWU - White Water Unit), que su-

ministra de forma constante agua aireada a través del área de crecimiento de los peces. Este flujo continuo de agua rica en oxígeno permite la crianza de peces a alta densidad, mejorando las condiciones de crecimiento y apoyando prácticas de acuicultura sostenibles (Fantini-Hoag et al., 2022).

Así mismo, se encuentran los sistemas de recirculación para acuicultura (RAS), los cuales serán explicados a fondo en el siguiente capítulo. Gracias a estas tecnologías, se pueden llevar a cabo actividades acuícolas en lugares con limitada disponibilidad de agua y condiciones climáticas adversas (Gichana et al., 2018).

FUNCIONAMIENTO Y PARTES DE LOS SISTEMAS RAS



¿Qué es un sistema RAS?

Los sistemas de recirculación para acuicultura (RAS) tienen como propósito cultivar especies acuícolas en un ambiente controlado, con una recirculación constante del agua. Esto da como resultado una reducción del consumo de agua del 90 al 99% en comparación con los sistemas tradicionales. La mayor fortaleza de estos sistemas es la disminución del impacto ambiental asociado al cultivo, además de permitir un control óptimo de los parámetros físico-químicos y de cultivo (Kamali et al., 2022). Estos sistemas presentan ventajas significativas en términos de bioseguridad, sostenibilidad ambiental y eficiencia económica; sin embargo, su instalación requiere una gran inversión económica, con importantes costos asociados a su funcionamiento y mantenimiento.

Su funcionamiento se basa en remover sólidos orgánicos y compuestos nitrogenados del agua a través de la sedimentación, filtración y tratamiento microbiano (nitrificación), para luego reacondicionarla mediante desinfección, oxigenación y eliminación de CO₂, antes de reincorporar el agua a los estanques de cultivo (Figura 3) (Shitu et al., 2022), usando para ello diversos equipos y tecnologías que serán explicados a continuación. De esta manera, se logra controlar los desechos, reducir el uso de agua y reciclar nutrientes (Murray et al., 2014).

presentan en cuanto a bioseguridad, control ambiental y sanitario, independencia de condiciones climáticas, entre otros (Zimmermann et al., 2023). Hoy en día, los RAS se utilizan en la producción de una amplia variedad de especies acuícolas alrededor del mundo, incluyendo salmón, trucha, tilapia, camarón y bacalao (Badiola et al., 2018). Se espera que su uso continúe expandiéndose, especialmente porque estos sistemas permiten llevar la acuicultura a áreas cercanas a los mercados de consumo, lo que reduce costos de transporte y emisiones de CO₂ (Ahmed et al., 2021). Sin embargo, aún existen desafíos importantes asociados a sus elevados costos de implementación y operación (Badiola et al., 2018). Por lo tanto, el desarrollo de tecnologías innovadoras, como la automatización de procesos y el uso de inteligencia artificial, pueden contribuir a mejorar la eficiencia y viabilidad económica de estos sistemas en el futuro (Varga et al., 2020). Este aspecto será revisado con mayor profundidad en el último capítulo de este documento.

Componentes del sistema

Tanques

Los tanques son una parte fundamental de los sistemas RAS, ya que son el ambiente de cultivo de los peces. Deben permitir mantener la calidad del agua y proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento y bienestar de las especies cultivadas. Existen diversos tipos de tanques, los circulares y los tanques tipo *raceways* o canaletas, los cuales

influyen en la distribución del oxígeno disuelto, la remoción de sólidos y la viabilidad de la especie que se va a producir. Los tanques circulares (Figura 4) favorecen los patrones de flujo, lo que lleva a que el agua se mueva alrededor del centro, disminuyendo el tiempo de residencia de las partículas orgánicas. Además, en el fondo del tanque se cuenta con una pendiente de entre 5 y 15% de inclinación, que actúa como un desagüe que proporciona un efecto de autolimpieza favorecido por el flujo circular. Los tanques de tipo *raceways* (Figura 5) permiten una mejor distribución del cultivo, lo que beneficia a especies de fondo, como el rodaballo o lenguado. Sin embargo, este tipo de tanques no posee el efecto de autolimpieza, y la remoción efectiva de sólidos depende del movimiento de los peces (Bregnballe, 2022).

Figura 4. Tanques circulares de cultivo en el Centro Agroempresarial y Acuícola SENA Fonseca, La Guajira



Fuente: elaboración propia.

Otra ventaja de los tanques circulares es que permiten una mejor distribución del oxígeno debido a que la columna de agua lo mezcla de manera uniforme, logrando la concentración de oxígeno deseada en el tanque (Ebeling y Timmons, 2012). Mientras que en los tanques de tipo *raceways* la concentración de oxígeno a la entrada es mayor que la de la salida, lo que lleva a una difícil regulación de oxígeno en el tanque, en donde las variaciones pueden resultar en fluctuaciones en los tanques (Murray et al., 2014).

Figura 5. Tanques tipo “pista”



Fuente: tomado de Fresh by Design (2024).

Además de la oxigenación en los tanques, se debe considerar el proceso de salida de residuos, por lo que el sistema debe poseer una malla adecuada para la salida óptima de desechos orgánicos sin permitir el paso de los peces. Una salida cónica o la presencia de pendiente en la parte inferior facilitan este proceso para la adecuada limpieza de los tanques. Así mismo, se recomienda que los tanques sean de material inerte, no tóxico y resistente a la corrosión como pueden serlo el PVC, concreto recubierto, geomembrana o fibra de vidrio (Balmoral Tanks, 2022).

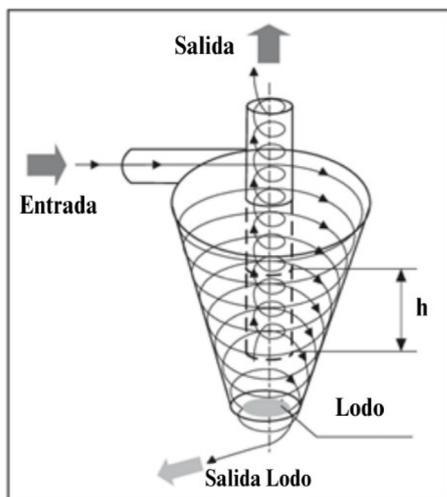
Sistema de filtración mecánica

En los sistemas RAS, las aguas residuales pueden contener cantidades considerables de alimento no consumido, excrementos y otras partículas sólidas que deben eliminarse en la etapa inicial del tratamiento del agua para reducir la carga orgánica. Esto se realiza a través de una filtración mecánica, en la cual se eliminan las impurezas del agua sin el uso de productos químicos. En los RAS, las partículas sólidas incluyen materiales inorgánicos (arena o arena gruesa) y materia orgánica como heces, restos de alimentos y floculación biológica. La materia orgánica generalmente contiene sólidos suspendidos, que son particularmente importantes en la acuicultura y están involucrados en el consumo de oxígeno durante la degradación de compuestos orgánicos y problemas de bioincrustación.

Existen diferentes tecnologías de filtración mecánica, entre las que se encuentran:

- **Equipos de separación sólido-líquido:** hacen uso de la fuerza centrífuga y la gravedad para lograr la remoción de las partículas con diámetro mayor a 80 mm, las cuales representan aproximadamente el 80% del material particulado (Bao et al., 2019). Un ejemplo de estos equipos son los separadores de remolino e hidrociclones (Figura 6), estos últimos se destacan por su mayor eficiencia al retirar las partículas finas que se encuentran en el agua.

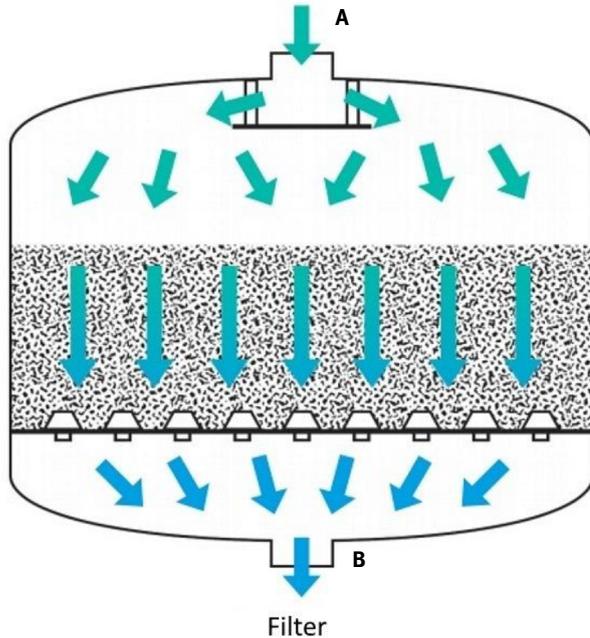
Figura 6. Diagrama hidrociclón



Fuente: tomado de Kurtela y Komadina (2010).

- **Filtros de arena:** son equipos cuyo principal material es arena de cuarzo, la cual actúa como una barrera física que atrapa y retiene los sólidos particulados al pasar el agua. Influyen de manera especial el tamaño, la forma y la porosidad del material, ya que las partículas de mayor tamaño son atrapadas en los espacios entre los granos de arena y las de menor tamaño usualmente se adhieren a la superficie de estas (Dongdong et al., 2014) (Figura 7).

Figura 7. Funcionamiento del filtro de arena

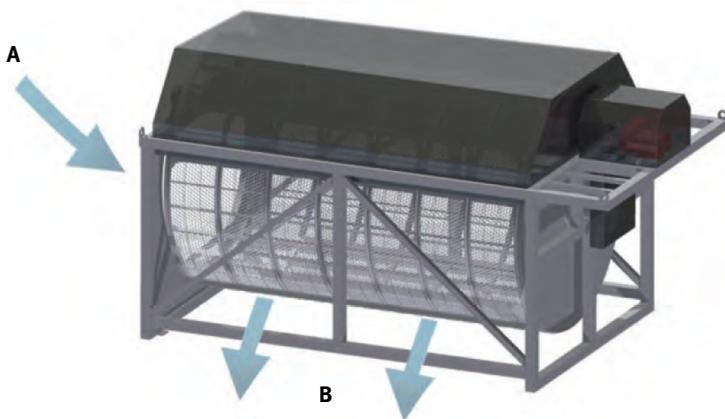


Fuente: tomado de Reijnen (2022).

- **Filtro tambor de microtamiz:** es una alternativa para los filtros de arena, ya que reduce la cantidad de agua residual. En este filtro, un tambor con una malla fina atrapa las partículas sólidas y estas son enviadas a la parte trasera usando una rotación del tambor.

Este proceso se lleva a cabo en equipos como el filtro tambor (Figura 8), el cual posee una malla de entre 20-100 micrómetros y cuyo funcionamiento se da con el ingreso del agua al filtro tambor, con la filtración a través del paso por la malla, en donde se retienen los sólidos que luego son enviados a la parte trasera del dispositivo gracias a la capacidad de rotación del tambor. Finalmente, los sólidos son recolectados y enviados para su tratamiento fuera del sistema.

Figura 8. Funcionamiento del filtro tambor



Nota: A) ingreso del agua con sólidos, B) salida del agua filtrada
Fuente: tomado de CM Aqua.

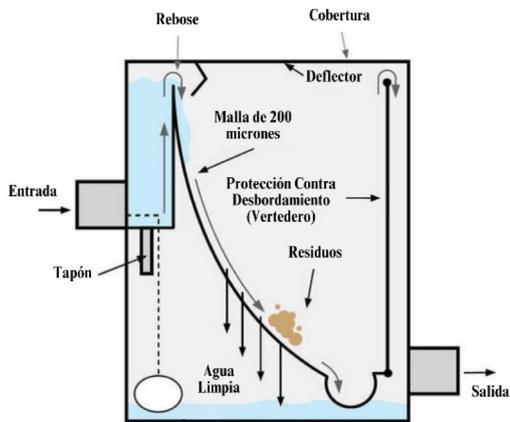
Figura 9. Filtro tambor instalado en el Centro Agroempresarial y Acuícola SENA Fonseca, La Guajira



Nota: verde: entrada de agua, azul: agua filtrada, rojo: salida de sólidos.
Fuente: elaboración propia.

- **Filtro de malla parabólica:** funciona usando la gravedad y la fuerza centrífuga para dirigir el flujo de agua hacia una malla curva. Las partículas más grandes quedan atrapadas en la malla, mientras que las más pequeñas pasan a través de ella. Este filtro es robusto, fácil de manejar, no requiere energía y tiene un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, necesita limpieza manual frecuente y tiene un bajo grado de automatización. Es efectivo para separar partículas suspendidas de más de 70 micrómetros en sistemas de recirculación de acuicultura (Sarosh et al., 2024) (Figura 10).

Figura 10. Funcionamiento del filtro de malla parabólica



Nota: el agua cae por la malla y los desechos son atrapados permitiendo la salida del agua filtrada por la parte inferior.

Fuente: adaptado de Aquamerik (2024).

- **Fraccionador de espuma:** los fraccionadores de espuma son efectivos en la purificación del agua en RAS para cultivo de especies marinas, eliminando sólidos en suspensión y materia orgánica disuelta. Sin embargo, en acuicultura de agua dulce, la falta de electrolitos reduce la formación y estabilidad

de la espuma, lo que lleva a una baja eficiencia de separación sólido-líquido; por esta razón, los fraccionadores de espuma no se suelen utilizar en sistemas de recirculación de agua dulce. A pesar de sus limitaciones, son adecuados para equipos marinos de purificación debido a su proceso sencillo, rendimiento estable y fácil mantenimiento. Estos fraccionadores ayudan a reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO) y la demanda química del mismo (DQO), y aumentan el oxígeno disuelto (OD), beneficiando el funcionamiento del biofiltro (de Jesus Gergersen et al., 2021).

- **Desnatador de proteínas:** un desnatador de proteínas es un equipo basado en un proceso conocido como separación por adsorción de burbujas que elimina sustancias nocivas como materia en suspensión, proteínas, nitrógeno amoniacal y nitrito de un sistema RAS, a fin de reducir la carga del tratamiento biológico (Lekang, 2020). Utiliza un dispositivo de chorro para mezclar finas burbujas de aire en el agua, aumentando el área de contacto entre agua y aire, lo que elimina gases nocivos y aumenta el contenido de oxígeno disuelto (OD). Los desnatadores de proteínas son valorados en la acuicultura por su estructura simple y tratamiento eficiente del agua. Sin embargo, presentan desventajas como el alto consumo de energía y la pérdida de sal y oligoelementos del agua. A pesar de esto, son efectivos para eliminar partículas orgánicas de las aguas residuales y regular la calidad del agua (Kovács et al., 2023).

En la Tabla 1 se observan las diferencias entre las distintas tecnologías disponibles de los filtros mecánicos y las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 1. Tipos de filtros mecánicos

Equipo	Diámetro del filtro (µm)	Ventajas	Desventajas	Referencia
Equipo de separación sólido-líquido	1-700	Tiene un mejor efecto sobre las partículas de gran tamaño, ocupa poco espacio, es fácil de instalar y gestionar, de bajo coste y con poca pérdida de agua	No es bueno para eliminar pequeñas partículas	(Lee, 2015; Zhang et al., 2024)
Filtro tambor	>60	Gran aplicabilidad, poco espacio, fácil mantenimiento, capacidad de autolimpieza	Necesidad de lavado de alta presión por chorro de agua, alta pérdida de energía	(Fernandes et al., 2015; Singh et al., 2022)
Filtro de pantalla parabólica	>70	Estructura sencilla, fácil manejo, sin consumo de energía y bajos costes de mantenimiento	Baja automatización, requiere una limpieza manual frecuente de la pantalla	(Xiao et al., 2019)
Filtro de arena	30-75	No contaminante, bajo costo, estructura sencilla, buen efecto de eliminación de partículas	Necesidad de lavado regular y filtro fácil de anudar	(Freitas de Oliveira et al., 2019)
Fracccionador de espuma	<60	Tiene un mejor efecto en el tratamiento de acuicultura con agua de mar, de bajo coste	Tiene un efecto negativo en el tratamiento de acuicultura con agua dulce, los equipos de flotación mecánica poseen un alto consumo de energía	(de Jesus Gregersen et al., 2021; Pfeiffer et al., 2024)
Desnatador de proteínas	<50	Estructura sencilla, alta eficacia de tratamiento del agua, mejor control de la calidad del agua	Alto consumo de energía, causan la pérdida de sal y trazas de elementos en el agua	(Kovács et al., 2023)

Fuente: adaptado de Ahmed et al. (2019).

Biofiltro

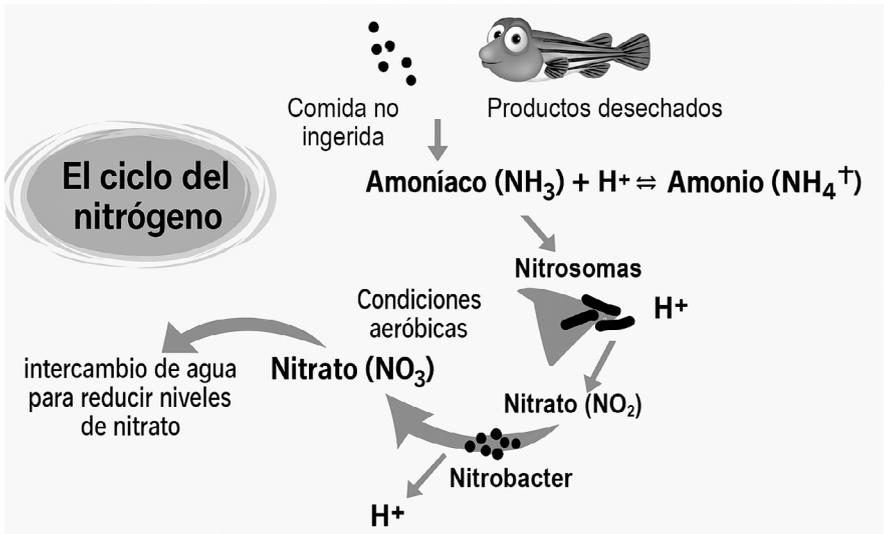
Pese a la gran cantidad de materia orgánica que es filtrada de manera mecánica, las partículas más finas pasan junto con compuestos disueltos como el fosfato y el nitrógeno total amoniacal (NAT). El fosfato, al ser una sustancia inorgánica sin efecto tóxico, no presenta problemas con su presencia en el sistema; sin embargo, el NAT, que proviene de los desechos fisiológicos de los peces y del alimento no consumido, cuando se encuentra en la forma de amoníaco (NH_3) es tóxico y requiere ser transformado en nitrato a través del proceso de nitrificación para su correcta eliminación del sistema, como se observa en la Figura 11. Esto es clave para mantener una correcta calidad del agua y evitar que los peces se vean afectados por la presencia de dichos contaminantes.

Esta reacción se da en el biofiltro en condiciones aeróbicas, y es llevada a cabo por bacterias o arqueas autótrofas y mixótrofas, entre ellas las más conocidas son los géneros *Nitrosomas* como bacteria oxidante de amonio (AOB), y *Nitrobacter* y *Nitrospira* como bacterias oxidantes de nitritos (NOB) (Preena et al., 2021).

Dado que este proceso es clave para el bienestar de los peces, la purificación biológica es el núcleo de los sistemas de recirculación (RAS) y, por lo tanto, implica la inclusión de un biofiltro con los materiales adecuados para la adhesión y proliferación de los microorganismos nitrificantes y la selección apropiada de los mismos (Ruiz et al., 2020). Existen diversas tecnologías para llevar a cabo el proceso de nitrificación:

- **Biofiltro de arena fluidizada:** en este filtro, partículas de arena son suspendidas y mantenidas en constante movimiento por el flujo de agua que pasa por el filtro. Esta fluidización de la arena genera una alta área superficial para la colonización bacteriana, lo que promueve el contacto entre el agua y la biopelícula presente en las partículas (Xiao et al., 2019) (Figura 12).

Figura 11. Proceso de nitrificación



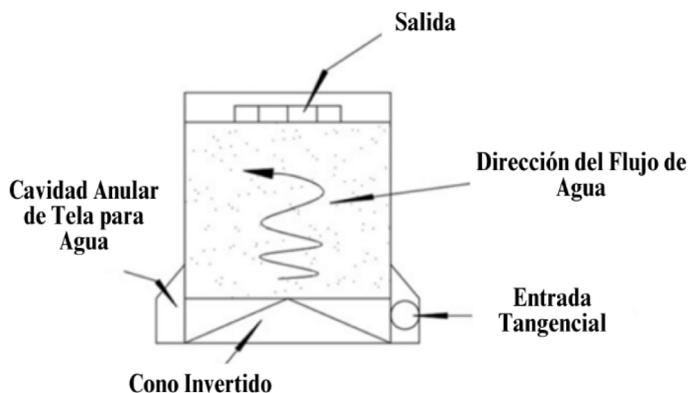
Nota: el amonio generado por los desechos de los peces y el alimento no consumido es transformado en nitrito y, posteriormente, en nitrato, el cual no es tóxico, y se va desechando a través de recambios de agua.

Fuente: tomado de Linbo (2009). Traducción propia.

- **Biorreactor de lecho móvil (MBBR - Moving bed bioreactor):** en estos biorreactores se incluyen medios de poliuretano o plástico con el objetivo de ofrecer una superficie amplia para el crecimiento de los microorganismos. Estos se adhieren al medio y realizan el proceso de nitrificación, moviéndose libremente en el reactor gracias a la aireación y el flujo de agua, y brindan un

ambiente dinámico para la formación de biopelícula. Este reactor proporciona un crecimiento de microorganismos tanto en el medio como en el agua, lo que incrementa la tasa de nitrificación y limpieza del sistema. Este filtro requiere poco mantenimiento y es ampliamente usado en los sistemas de recirculación (Figura 13) (Qi et al., 2025).

Figura 12. Biofiltro de arena fluidizada



Nota: el agua ingresa de manera lateral y asciende hasta la parte superior. Gracias a esto, el agua permanece en contacto directo con las colonias.

Fuente: tomado de Xiao et al. (2019).

- **Biorreactor de lecho fijo (FBBR - Fixed bed bioreactor):** en este equipo, una capa de medio fijo, como roca, arena o plástico proporciona una superficie para el crecimiento de microorganismos. De esta manera, se genera una biopelícula que actúa como biofiltro, la cual, al estar fija, asegura un contacto constante con el agua, promoviendo el tratamiento eficiente de contaminantes. No obstante, uno de los factores por considerar es que requiere mantenimiento constante como remover sólidos acumulados para prevenir atascos (Pulkkinen et al., 2019).

Figura 13. Biorreactor de lecho móvil instalado en el Centro Industrial y de Energías Alternativas, Riohacha, La Guajira



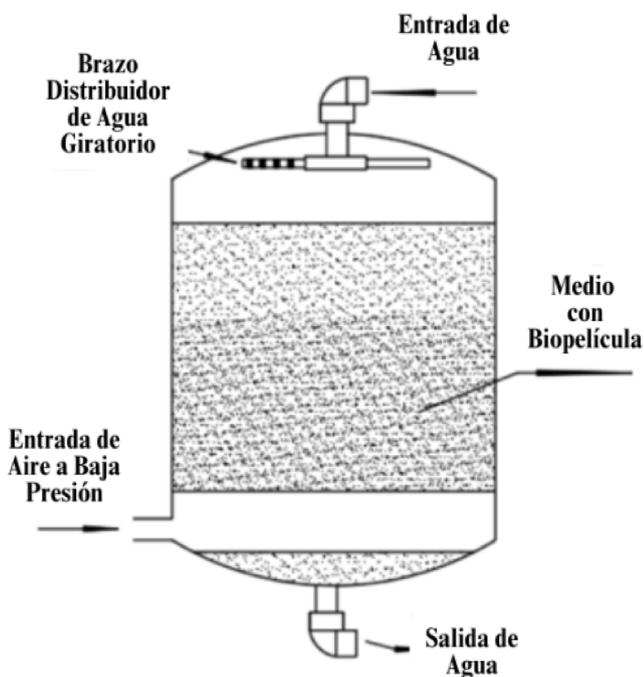
Nota: el agua pasada por el filtro tambor cae al biofiltro en donde se lleva a cabo la nitrificación gracias a los bioelementos (A) y el oxígeno proporcionado por las mangueras difusoras (B).

Fuente: elaboración propia.

- **Filtro de goteo:** este sistema hace uso del mismo principio del biorreactor de lecho fijo, sin embargo, se diferencia en que en este filtro el agua se distribuye en forma de goteo sobre la biopelícula para incrementar la efectividad del proceso de nitrificación y eliminación de contaminantes. Requiere un monitoreo y mantenimiento periódico para conservar en buen estado el sistema de goteo y la biopelícula (Figura 14) (Godoy-Olmos et al., 2019).
- **Filtración por microesferas:** se usan pequeñas esferas de plástico como el medio sobre el cual se da el crecimiento de los microorganismos y la formación de la biopelícula.

Este filtro incorpora tecnología que mantiene las esferas en constante movimiento, previniendo atascos y promoviendo el contacto eficiente entre la biopelícula y el agua. Gracias a su alta relación área-volumen mejora la eficiencia del tratamiento. Además, provee una filtración adicional al atrapar sólidos suspendidos y materia particulada en los espacios entre las microesferas (Rodríguez-Leal et al., 2023).

Figura 14. Biofiltro de goteo



Fuente: adaptado de Xiao et al. (2019).

Todas estas tecnologías pueden ser usadas en los sistemas RAS, sin embargo, cada una posee sus ventajas y desventajas, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tecnologías de biofiltración, comparación entre ventajas y desventajas, área superficial y consumo energético

Tecnología	Tasa de llenado (%)	Consumo energético	Área superficial específica (m²/m³)	Ventajas	Desventajas	Referencia
Biofiltro de arena fluidizada	30-40	Alto	500-20000	Gran superficie específica, tiene capacidad de autolimpieza, alta eficiencia de conversión de nitrógeno amoniacal, gran carga	Alto consumo de energía, filtro difícil de arrancar, medio fácil de perder	(Xiao et al., 2019)
Biorreactor de lecho móvil (MBBR)	20-70	Bajo	500-800	Bajo coste, alta eficacia de tratamiento del agua, gran carga orgánica, poca pérdida de cabezal, capacidad de autolimpieza	Pequeña cantidad de agua por tratar	(Pulkkinen et al., 2019; Qi et al., 2025)
Biorreactor de lecho fijo (FBBR):	30-60	Bajo	200-500	Alta porosidad, alta eficacia de eliminación de NAT	Fácil de taponar, menor eficacia de autolimpieza, necesidad de retrolavado regular	(Pulkkinen et al., 2019)
Filtro de goteo	40-80	Bajo	100-1000	Bajo costo, alta durabilidad y porosidad suficiente para evitar la obstrucción y favorecer la ventilación	Cubre una gran superficie, fácil de taponar, los medios filtrantes tienen un precio más elevado	(Godoy-Olmos et al., 2019; Setiadi et al., 2019)

Tecnología	Tasa de llenado (%)	Consumo energético	Área superficial específica (m ² /m ³)	Ventajas	Desventajas	Referencia
Filtración por microesferas	50	Alto	1500-4000	Alta superficie específica, alta eficiencia de procesamiento, no se obstruye fácilmente	Alto consumo de energía y elevado coste	(Rodríguez-Leal et al., 2023; Timmons et al., 2006)

Fuente: adaptado de Xiao et al. (2019).

El biofiltro es clave para el funcionamiento del sistema, y por ello un correcto manejo es la clave para un cultivo exitoso y para garantizar que los niveles de compuestos nitrogenados se mantengan en parámetros óptimos, asegurando un ambiente saludable para los peces y optimizando la eficiencia del sistema RAS. Por esto, la correcta estimación del NAT y el mantenimiento y monitoreo de la alcalinidad del sistema son fundamentales para garantizar el funcionamiento óptimo del biofiltro. A lo largo del ciclo de producción, la cantidad de amoníaco generado está directamente relacionada con la alimentación y el crecimiento de los peces, por lo que el biofiltro debe estar bien madurado y equilibrado. El monitoreo regular de parámetros como el amonio, los nitritos, la alcalinidad y pH es crucial para asegurar que el biofiltro funcione de manera eficiente, evitando la acumulación de compuestos tóxicos que podrían comprometer la salud del cultivo. Por ello, a continuación, se muestra cómo di-

mensionar el biofiltro y estimar el NAT y la cantidad de alcalinidad necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

Estimación del nitrógeno amoniacal total (NAT)

Se sabe que por cada kilogramo de alimento proporcionado a los peces, se producen entre 0,02 y 0,04 kg NAT. Sin embargo, dado que cada estadio de crecimiento posee requerimientos de proteína diferentes, también se puede estimar al calcular la cantidad de nitrógeno consumido y, posteriormente, la cantidad de nitrógeno total amoniacal (NAT), de la siguiente manera:

Ecuación 1. Cálculo de nitrógeno total amoniacal producido en el sistema

$$N_{\text{consumido}} = \text{Cantidad de alimento (kg)} * a * 0.16 \frac{g_N}{g_p}$$

$$NH_3 - N \text{ excretado} \left(\frac{kg_{NAT}}{\text{día}} \right) = 0.6 * N_{\text{consumido}}$$

$$\frac{kg_{NAT}}{\text{día}} = \frac{1000 g_{NAT}}{\text{día}}$$

Donde:

a = % proteína, el cual está dado por el proveedor de alimento y el requerimiento por especie

g_N = gramos de nitrógeno

g_p = gramos de proteína del alimento

Dimensionamiento del biofiltro

En caso de querer estimar el tamaño del biofiltro, es necesario conocer cierta información. Primero, se

requiere conocer la cantidad de NAT producida por el sistema a máxima capacidad usando la Ecuación 1 para poder estimar el requerimiento máximo. Posteriormente, se necesita conocer la capacidad nitrificante del biofiltro, proporcionada por el proveedor de este, que varía según la tecnología usada y se representa usando la tasa de conversión volumétrica de NAT ($\text{g NAT}/\text{m}^3/\text{día}$) o VTR por sus siglas en inglés.

Con esta información se puede estimar el tamaño del biofiltro de la siguiente manera:

Ecuación 2. Estimación del tamaño del biofiltro

$$\text{Volumen biofiltro (m}^3\text{)} = \frac{\text{NAT producido} \left(\frac{\text{g}_{\text{NAT}}}{\text{día}} \right)}{\text{VTR} \left(\frac{\text{g}_{\text{NAT}}}{\text{m}^3/\text{día}} \right)}$$

Importancia de la alcalinidad

La nitrificación consume NAT y oxígeno a partir del uso de bacterias nitrificantes. Este proceso genera iones $[H^+]$ que acidifican el agua y afectan a los peces y microorganismos, ya que estos prefieren pH entre 7 y 8,5. Cuando el pH disminuye por debajo de dicho rango, es necesario proveer al sistema de alcalinidad para equilibrarlo de nuevo, sin aumentarlo en exceso, ya que el aumento del pH trae consigo una mayor proporción de amoníaco NH_3 , lo cual puede afectar el proceso de nitrificación (1,4 $\text{mg NH}_3/\text{L}$ inhibe hasta en un 99%), y ser tóxico para el cultivo (0,6 $\text{mg NH}_3/\text{L}$ resultan tóxicos en el caso de la tilapia).

Maduración del biofiltro

El uso del biofiltro inicia con la maduración del sistema, que consiste en su colonización con microorganismos nitrificantes. Para ello se deben introducir cultivos comerciales o colocar peces que, a través de sus heces, liberen los microorganismos. El seguimiento al proceso de maduración se realiza por medio de la medición de parámetros fisicoquímicos como amonio, nitritos, alcalinidad, nitratos, temperatura y pH, que deben estar en el rango adecuado para la especie que se va a cultivar. A continuación, se describe la secuencia de pasos por seguir para la adecuada maduración del biofiltro.

- Se miden los principales parámetros: la concentración de amonio, nitritos, alcalinidad, nitratos, salinidad, temperatura y pH del sistema usando sondas multiparamétricas, equipos de fotometría de campo o kits de medición para acuicultura.
- Se hacen los cálculos y se ajustan los niveles de amonio y nitrito hasta 5 mg/L y la alcalinidad hasta un mínimo de 120 mg/L, usando para ello cloruro de amonio (NH_4Cl), nitrito de sodio (NaNO_2) y bicarbonato de calcio (NaHCO_3). Para realizar estos cálculos se debe tener en cuenta el volumen total del sistema.
- Se miden los parámetros fisicoquímicos cada dos días para evaluar la disminución de los niveles de nitrógeno total amoniacal, nitrito, alcalinidad y pH, y la formación de nitrato.
- En cuanto el amonio y nitrito disminuyan hasta una concentración de 2 mg/L, llevar de nuevo la concentración hasta 5 mg/L.

- Cuando los niveles disminuyan se debe medir diariamente, en cuanto este cambio abrupto se dé de un día para otro, el biofiltro estará listo.
- Mantener las condiciones hasta la llegada de los peces y, en ese punto, no agregar más sales.
- Regular la alcalinidad por cada etapa de crecimiento.

Desinfección

Otro proceso importante en el funcionamiento de los sistemas RAS es la desinfección. Esto se debe a que la fuente externa de agua, ya sea marina, de ríos o incluso de pozos puede contener microorganismos potencialmente patógenos para los peces. Además, la acumulación de amonio y materia orgánica, resultado de la alimentación y el cultivo intensivo, crea un ambiente ideal para el crecimiento de estos microorganismos (Subramanian et al., 2020). Por esta razón, es crucial controlar su proliferación antes de que se conviertan en un problema serio para el cultivo.

Para la desinfección se usan principalmente dos tecnologías (Tabla 3):

- **Ultravioleta:** en la desinfección UV, los rayos de energía ultravioleta C (UVC), con una longitud de onda de aproximadamente 254 nm, penetran la membrana celular de los microorganismos causando su muerte al detener todas las actividades celulares (Figura 15). Esto ocurre porque estos rayos son absorbidos por el ADN de los patógenos, un proceso conocido como inactivación (Song et al., 2016). Al no utilizar productos químicos, la desinfección UV no genera residuos y los

microorganismos no pueden desarrollar resistencia a este tipo de desinfección, lo que lo convierte en uno de los métodos de esterilización más usados. Pese a esto, hay que tener en cuenta que poseen un ciclo de vida determinado y después de este tiempo disminuye su eficiencia (Uyğün et al., 2023).

Figura 15. Filtro UV y medidor vida útil instalado en el Centro Industrial y de Energías Alternativas, Riohacha, La Guajira



Fuente: elaboración propia.

- **Ozono:** debido a su potente capacidad de oxidación, el ozono puede provocar la desnaturalización oxidativa de la cubierta proteica de la pared celular, la membrana celular y algunas sustancias adiposas. También puede dañar la estructura celular de las bacterias patógenas. La capacidad oxidante del O_3 puede alterar las características de la superficie de las partículas en suspensión, degradar sustancias tóxicas y eliminar diversos microorganismos patógenos, desempeñando un papel crucial en la purificación y desinfección del agua. Además, el O_3 puede oxidar

algunas sustancias aeróbicas presentes en el agua, reduciendo eficazmente la demanda biológica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST), el nitrógeno total amoniacal (NAT) y el carbono orgánico total (OC) en los sistemas RAS (de Jesus Gregersen et al., 2021). Por esto, el ozono se ha utilizado para controlar patógenos, materia orgánica y para oxidar NO_2 a NO_3 (Mook et al., 2012). Sin embargo, posee efectos negativos como una genotoxicidad que daña las células de los organismos cultivados y puede generar afectaciones a la salud de los peces, por lo que no se recomienda su uso en los tanques, si no en el tanque reservorio, para tratamiento previo del agua.

Tabla 3. Comparación de tecnologías de desinfección

Tecnología	Eficiencia	Mecanismo de esterilización	Ventajas	Desventajas	Referencia
Ozono (O_3)	>90%	La potente capacidad de oxidación del O_3 puede provocar la desnaturalización oxidativa de la pared y la membrana celulares, además de oxidar algunas sustancias aeróbicas	Una fuerte capacidad de oxidación permite degradar materia orgánica, eliminar sustancias tóxicas, lograr una alta eficiencia de esterilización y mantener la calidad del agua estable	La baja eficiencia en la eliminación de nitrógeno amoniacal y el ozono residual puede ser perjudicial para los peces	(de Jesus Gregersen et al., 2021; Mook et al., 2012)
UV	>80%	Las longitudes de onda de luz UV entre 250 y 260 nm pueden emplearse para destruir residuos de O_3 , desnaturalizar ADN o ARN, o causar la muerte o pérdida de función en microorganismos	Seguro, eficiente y sin generación de contaminación secundaria	Requiere limpieza y reemplazo regulares, y podría favorecer la regeneración de bacterias	(Song et al., 2016; Uyğun et al., 2023)

Fuente: elaboración propia.

Estos sistemas suelen ser usados de manera conjunta debido a que se puede usar la luz UV para eliminar los residuos de O_3 a la vez que el ozono complementa el funcionamiento de la luz UV y mejora la desinfección general del sistema (Lu et al., 2022).

Sistema de oxigenación

La oxigenación juega un papel crítico en los sistemas de recirculación para acuicultura al permitir altas densidades de cultivo (Davidson et al., 2016). Existen varios métodos para la incorporación de oxígeno, cada uno con diferencias en eficiencia energética, tasa de transferencia y costos asociados.

Recientemente, han surgido sistemas que utilizan oxígeno puro u oxígeno líquido para saturar la concentración o incluso sobresaturar los niveles de oxígeno disuelto (OD), lo que promueve el crecimiento y el bienestar de los peces (Hashibur et al., 2022; Rahman et al., 2022).

Es esencial monitorear continuamente los niveles de OD mediante sondas electrónicas de medición y ajustar la oxigenación según las necesidades específicas de cada especie. Cada especie cultivada requiere diferentes niveles de oxígeno disuelto, siendo el salmón una de las más exigentes, con un requerimiento de 9 mg/L, seguido por la trucha con 6 mg/L. Las tecnologías de oxigenación más usadas son:

- **Aireación tradicional:** se usan *blowers* o aireadores y difusores que toman el aire del ambiente y lo envían a

los tanques del sistema (Figura 16). Sin embargo, pese a sus bajos costos, este método tiene una baja eficiencia y un alto consumo energético (Xiao et al., 2019).

Figura 16. Mangueras difusoras y *blower* instalado en el Centro Industrial y de Energías Alternativas, Riohacha, La Guajira



Nota: a la derecha se aprecia el *blower* encargado de dar el respaldo de oxígeno. En la izquierda se aprecia las mangueras difusoras de oxígeno encargadas de distribuir el aire proporcionado por el *blower*.

Fuente: elaboración propia.

- **Inyección O_2 :** se usan generadores de O_2 y difusores para sobresaturar el agua y asegurar su alta calidad y la concentración de oxígeno disuelto. Uno de los ejemplos de esto es la tecnología de nano burbujas (Figura 17), la cual tiene la capacidad de mejorar la calidad del agua e incluso apoyar la desinfección al poseer burbujas lo suficientemente pequeñas para destruir los patógenos en el sistema (Supriyono et al., 2023).

Figura 17. Generador de oxígeno y nano burbujas instalado en el Centro Industrial y de Energías Alternativas, Riohacha, La Guajira



En la izquierda se aprecia el generador de oxígeno puro y en la derecha el generador de nanoburbujas a partir del oxígeno proporcionado por el generador.

Fuente: elaboración propia.

La elección del método adecuado de oxigenación depende de varios factores, como el tipo de especie cultivada, la escala de producción y los objetivos del sistema. Los métodos tradicionales como la aireación son más accesibles y económicos, pero presentan limitaciones en términos de eficiencia energética y transferencia de oxígeno. Por otro lado, las tecnologías más avanzadas, como la inyección de oxígeno puro y las nano burbujas, ofrecen mayores niveles de oxígeno disuelto y ventajas adicionales como la desinfección, lo que las convierte en opciones preferentes en sistemas de alta

capacidad y cultivos más exigentes, pero representan un mayor costo.

Consideraciones adicionales

Estas tecnologías pueden implementarse de manera modular, permitiendo combinar distintas opciones para cada componente esencial de los sistemas RAS, según las necesidades específicas del productor. Por ejemplo, es posible integrar un filtro de tambor con un biofiltro de goteo, un biofiltro de lecho móvil (MBBR) o de lecho fluidizado (FBBR), entre otras combinaciones. Esta flexibilidad abre un abanico de posibilidades, permitiendo a los productores seleccionar tecnologías adaptadas a su presupuesto, capacidad de producción y objetivos específicos. Así, los sistemas pueden configurarse para reducir costos, ampliar el número de tanques o mejorar la eficiencia en la gestión de la calidad del agua, lo que contribuye a una operación más ajustada y optimizada según las condiciones particulares de cada instalación.

USO DE SISTEMAS RAS



Alternativas de siembra y cultivo de peces en un sistema RAS τ

En un sistema RAS, la planificación del cultivo es primordial para asegurar el óptimo rendimiento del sistema en términos de parámetros productivos de los peces y su bienestar. Existen dos métodos principales para la gestión de la siembra: siembra *batch* (lotes) y siembra escalonada.

En la siembra *batch*, todos los animales se introducen en el sistema al mismo tiempo y se cultivan hasta que alcanzan el tamaño de cosecha, momento en el cual se retiran. Este método se caracteriza por su simplicidad, ya que no requiere traslados ni ajustes continuos de densidad de siembra. Por otro lado, en la siembra escalonada, los animales se introducen en el sistema en diferentes etapas de crecimiento. A medida que algunos lotes se encuentran finalizando el tiempo de engorde, otros están comenzando su ciclo de levante, esto permite una producción más continua y un uso más eficiente de los recursos del sistema.

Cada método tiene sus propias ventajas y desafíos (Tabla 4) y la elección este depende de factores como los objetivos de producción, la capacidad del sistema y la logística de manejo.

Guía de siembra

En la Figura 18 se observa el procedimiento de limpieza y desinfección de los tanques acuícolas del

Tabla 4. Ventajas y desventajas de cada método de siembra

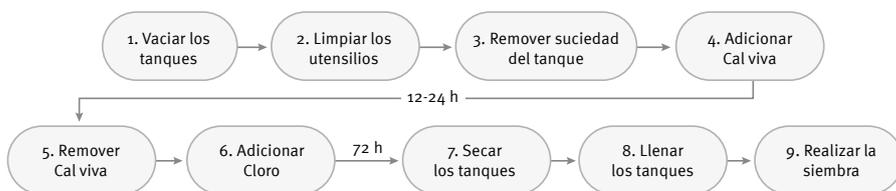
Método para gestión de siembra	Ventajas	Desventajas
Batch (lotes)	<p>Manejo sencillo debido a que todos los peces se encuentran en la misma etapa del ciclo.</p> <p>No hay traslados de un tanque a otro ni ajuste constante de densidad de siembra.</p> <p>Cosecha homogénea y facilitación de la planificación para venta y distribución del producto.</p>	<p>Periodos sin producción por inactividad en el ciclo.</p> <p>Se necesita un biofiltro de mayor tamaño y mejor oxigenación para evitar amonio en alta densidad de siembra antes de la cosecha.</p>
Escalonada	<p>Aseguramiento de un flujo continuo de productos al mercado por continuidad en la producción.</p> <p>Optimización del uso del sistema y uso eficiente de los recursos por continuidad en la producción.</p> <p>La distribución de la carga del sistema reduce el oxígeno requerido, estabiliza el biofiltro, prolonga la vida útil y disminuye los costos.</p>	<p>Manejo complejo debido a las diversas etapas de cultivo, exigiendo mayor planificación de siembras, monitoreo y alimentación adecuada.</p> <p>Variabilidad del tamaño y calidad del producto por cambios en las condiciones climáticas de cada periodo.</p>

sistema RAS en Fonseca después de cada ciclo de cultivo, el cual consiste en ocho pasos que deben realizarse antes de la siembra, estos son:

- Vaciar el estanque de producción en caso de que este contenga agua.
- Lavar con yodo los utensilios para la limpieza.
- Restregar las paredes y el fondo del estanque para remover sólidos sedimentados y demás material presente en el tanque.
- Adicionar cal viva como agente desinfectante del tanque, frotar con una escoba o cepillo sus paredes y dejar actuar durante 12-24 horas.

- Adicionar agua a presión para remover la cal presente en el tanque y restregar fuertemente las paredes y el fondo para completar el proceso de desinfección.
- Adicionar pastillas de cloro de 20 g hasta lograr una concentración de 1,7 mg/L y abrir la aireación al 100%. Este proceso tarda 72 horas, tiempo suficiente para que el cloro logre evaporarse antes de realizar la siembra de los ejemplares.
- Dejar secar el tanque.
- Adicionar agua limpia hasta un 80% del volumen del tanque.

Figura 18. Proceso de limpieza y desinfección de los tanques



Fuente: elaboración propia.

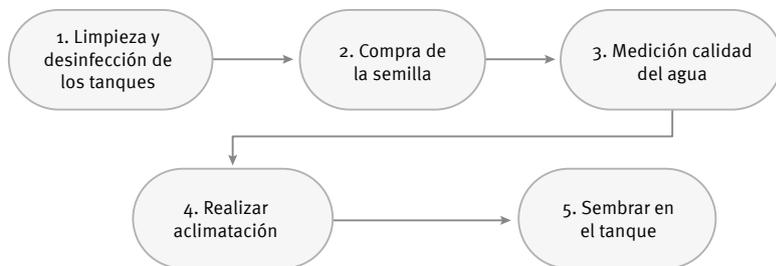
Una vez realizado este procedimiento, se lleva a cabo la siembra de los alevinos como se explica en la Figura 19. Este procedimiento se realiza de la siguiente manera:

1. Adquirir la semilla: este paso es estratégico para procurar un cultivo exitoso, pues la compra de alevinos certificados libres de patógenos y provenientes de granjas autorizadas es el primer paso relacionado con el manejo sanitario y una buena productividad.
2. Medir parámetros de calidad del agua como temperatura, pH, oxígeno disuelto OD y salinidad de cada tan-

que por sembrar. Así mismo, medir los parámetros de calidad de agua de la bolsa donde viene contenida la semilla, para garantizar que las condiciones del agua del tanque sean las mismas o parecidas a aquella en la que están los ejemplares. En caso de que difieran, se ajustarán las condiciones del tanque hasta que estén próximas a las de los ejemplares.

3. Realizar la aclimatación de los ejemplares. Esta tarea consiste en introducir la bolsa donde están los ejemplares en el tanque de producción y dejarlos durante 15 a 20 minutos aproximadamente.
4. Pasar los ejemplares por la preparación de agua con sal con un colador o nasa.
5. Realizar la siembra.

Figura 19. Procedimiento de siembra de alevinos



Fuente: elaboración propia.

Alimentación

Esta es una variable relevante en el cultivo de cualquier especie acuática, ya que debe responder a las necesidades fisiológicas de la especie en cuestión. Entre los aspectos más relevantes está la naturaleza de la alimentación de la especie, es decir, si se

trata de una especie omnívora o carnívora, si es un pez o una especie bentónica como los camarones.

Ajuste de la alimentación según la etapa de crecimiento

En el caso de la tilapia, la alimentación está directamente relacionada con el peso del pez y su tasa de crecimiento, como se muestra en la Tabla 5, donde se especifica la cantidad de alimento que se debe proporcionar según el peso del pez. Además, se recomienda ajustar los niveles de proteína en cada etapa de crecimiento. Sin embargo, estos valores pueden variar según el proveedor de alimento, por lo que es importante consultar las recomendaciones de la casa comercial antes de administrar la dieta.

Tabla 5. Porcentaje de proteína y ración recomendada

Peso (g)	Estadio	Número de raciones	Proteína (%)	Cantidad (% biomasa de peces)
1-10	Alevinaje	8 a 10	45	10
10-50	Levante	4 a 6	38	6
50-200	Preengorde	3 a 4	32	3
>200	Engorde	2 a 3	24	1,5

Como se observa, a medida que los peces crecen, el contenido de proteína requerido disminuye, así como la cantidad respecto al peso del pez, de tal manera que durante las etapas iniciales se les debe proporcionar mayor cantidad de alimento y proteína para desarrollar adecuadamente los tejidos y órganos.

Recomendaciones

Monitoreo regular: es fundamental realizar muestreos cada 15 o 20 días para ajustar la alimentación a los requerimientos del cultivo, en cantidad, número de raciones y porcentaje de proteína.

No sobrealimentar: si se alimenta en exceso los peces no consumirán el alimento en su totalidad, lo que provoca que este se descomponga y aumente el NAT del sistema.

Administración de alimento: se recomienda administrar el alimento de manera equivalente en la superficie de los tanques, a fin de mantener una uniformidad en la talla de los peces.

Calidad del agua

La calidad del agua es uno de los factores más críticos para el éxito de un sistema (RAS). Los peces dependen de un ambiente controlado para su bienestar y crecimiento, y cualquier desviación significativa de los parámetros óptimos puede provocar estrés, enfermedades o incluso mortalidad en el cultivo. Por lo tanto, es fundamental monitorear y ajustar regularmente las condiciones del agua en el sistema.

Temperatura

La temperatura influye directamente en el metabolismo de los peces, su consumo de alimento y la eficiencia de conversión del mismo. Es importante

mantener la temperatura dentro de los límites recomendados por especie para garantizar un crecimiento adecuado.

pH

El pH del agua afecta tanto la salud de los peces como la eficacia del biofiltro. Las bacterias nitrificantes del biofiltro funcionan mejor en un rango de pH de 7.0 a 8.5. Fuera de este rango, el proceso de nitrificación puede verse afectado, lo que resultaría en una acumulación de compuestos tóxicos como el amoníaco. Un pH bajo puede causar estrés a los peces, mientras que un pH alto aumenta la proporción de amoníaco no ionizado (NH_3), que es un compuesto tóxico para los peces. Los rangos óptimos para la mayoría de las especies oscilan entre 7 y 8.

Oxígeno disuelto (OD)

Los niveles de oxígeno disuelto deben mantenerse por encima de 5 mg/L para la mayoría de las especies de peces de agua dulce, como la tilapia. Los niveles bajos de oxígeno pueden reducir el apetito de los peces, ralentizar su crecimiento y aumentar la mortalidad, especialmente en sistemas de alta densidad. Además, el oxígeno es necesario para el funcionamiento del biofiltro.

Amoníaco (NH_3) y nitrógeno amoniacal total (NAT)

El amoníaco es uno de los productos tóxicos más peligrosos en un sistema acuícola. Se genera como resultado del metabolismo de los peces y se convierte en nitrato mediante la acción de bacterias

nitrificantes establecidas en el biofiltro. Los niveles de amoníaco no deben exceder los 0,0125 mg/L, ya que por encima de este valor el crecimiento de los peces se verá afectado. El NAT, que incluye tanto amoníaco no ionizado (NH_3) como amonio ionizado (NH_4^+), debe ser monitoreado constantemente para evitar niveles tóxicos. El amoníaco depende a su vez de la temperatura y el pH: a mayor temperatura y mayor pH aumenta su concentración.

Nitritos (NO_2^-)

Los nitritos son un subproducto intermedio en el proceso de nitrificación. Niveles elevados de nitritos son tóxicos para los peces, ya que interfieren con el transporte de oxígeno en la sangre. Es crucial mantener los niveles de nitritos por debajo de 0,5 mg/L para evitar problemas de salud en los peces.

Nitratos (NO_3^-)

Los nitratos son el producto final de la nitrificación y, en concentraciones moderadas, son menos tóxicos que el amoníaco y los nitritos. Sin embargo, niveles altos de nitratos pueden afectar el crecimiento de los peces y la calidad del agua a largo plazo. Se recomienda mantener los niveles de nitratos por debajo de 10 mg/L, realizando recambios parciales de agua para evitar su acumulación en el sistema.

Alcalinidad

La alcalinidad mide la capacidad del agua para neutralizar los ácidos o para amortiguar el efecto de pH ácido. Ayuda a mantener la estabilidad del sistema

y permite que el biofiltro funcione eficientemente. Los niveles de alcalinidad deben mantenerse entre 120 y 300 mg/L de CaCO₃ para asegurar una capacidad adecuada de neutralización de ácidos.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos estudiados en el cultivo de tilapia y sus valores óptimos

PARÁMETROS	RANGOS
Temperatura	26-30 °C
Oxígeno disuelto	> 5,0 mg/L (70-100% saturación)
pH	6,5-8,5
Alcalinidad total	120-300 mg/L
Nitritos	< 0,5 mg/ L
Nitratos	< 10 mg/L
Amoníaco NH ₃	< 0,0125 mg/L

Fuente: adaptado de Valenzuela Vargas et al. (2017) y Welker et al. (2012).

Estos parámetros se consideran óptimos porque, aunque los peces pueden sobrevivir a concentraciones más elevadas de compuestos como amoníaco, nitritos o nitratos, su crecimiento y bienestar se ven afectados fuera de estos rangos. Si estos parámetros se encuentran fuera del rango óptimo pueden generar estrés en los peces, lo que afecta su sistema inmunológico y los hace más susceptibles a enfermedades. Además, un entorno desequilibrado disminuye la eficiencia del sistema en términos de conversión alimentaria y productividad, lo que impacta negativamente en el rendimiento general del cultivo. Mantener estos parámetros dentro

de los límites recomendados no solo asegura un crecimiento saludable, sino que contribuye a la sostenibilidad a largo plazo del sistema, evitando complicaciones que puedan derivar en pérdidas económicas significativas.

Posibles emergencias

Acumulación de amoníaco

Factores que generan acumulación de amoníaco

- Exceso de alimentación: un exceso de alimentación puede resultar en acumulación de alimento no consumido por los peces en el sistema, que luego se descompone y genera amoníaco.
- Ineficiencia del biofiltro: si el biofiltro no se encuentra activo o madurado adecuadamente, no podrá realizar el proceso de nitrificación de manera apropiada, lo que impide la conversión de NAT en nitritos y nitratos, y aumenta la concentración de amoníaco en el sistema.
- Altos niveles de densidad de siembra: al encontrarse más peces en el mismo espacio, se incrementa la excreción de amonio, lo cual puede exceder la capacidad del biofiltro, lo que deriva en un incremento en los niveles de amoníaco.
- Condiciones inadecuadas de pH y temperatura: debido a que el equilibrio entre el amonio (NH_4^+) y el amoníaco (NH_3) depende de estos factores, y al tener un pH superior a 8.5-9 en el sistema, la concentración de amoníaco se incrementa.

Efectos de la acumulación de amoníaco en el sistema

- Estrés: el amoníaco afecta la respiración de los peces, lo que genera estrés y disminuye la alimentación y,

por ende, afecta el crecimiento de la tilapia (Randall y Tsui, 2002). Esto se observa en señales como muerte súbita, letargo, pérdida de apetito y aumento de la respiración (Sanders, 2024).

- Enfermedades: una concentración elevada de amoníaco puede derivar en el debilitamiento del sistema inmune de los peces, lo que deriva en la propagación de enfermedades y mortalidad del cultivo.
- Muerte del cultivo: a concentraciones elevadas el pez deja de alimentarse y se intoxica, lo que lleva a la pérdida total del cultivo.

Medidas de prevención

- Monitoreo: es esencial medir –mínimo de manera semanal– los parámetros fisicoquímicos para poder identificar señales de alarma y realizar medidas preventivas como pueden ser los recambios de agua.
- Control de pH y temperatura: mantener el pH entre 7-7.5 y la temperatura en un rango de 26-30 °C (en caso de la tilapia) para evitar que el equilibrio de amonio se incline hacia el amoníaco. Por ello es clave suministrar la alcalinidad requerida por el sistema para llevar a cabo la nitrificación y no en exceso.
- Mantenimiento del biofiltro y filtro tambor: es importante contar con un biofiltro madurado y oxigenado correctamente, así como asegurarse de mantener la densidad de siembra dentro de los límites de este. En cuanto a la filtración mecánica, si no funciona adecuadamente, el incremento de los sólidos del sistema resulta en el incremento del amonio.
- Evitar el sobrealimentado: al dar la dosis justa de alimento y en diferentes raciones durante el día, se evita el exceso y se distribuye la excreción de los peces para impedir la sobrecarga del biofiltro.

- Recambios de agua: mantener recambios de entre 5 y 10% para evitar la acumulación de nitratos y amonio y, en caso de tener un incremento fuera de lo común, aumentar los recambios.

Falla eléctrica

Factores que contribuyen a los efectos negativos de una falla eléctrica

- Dependencia del sistema a una única red eléctrica: si el sistema se encuentra conectado a una única red, en caso de que esta falle todo el sistema dejará de funcionar.
- Alta densidad de peces ($>60 \text{ kg/m}^3$): al tener una densidad demasiado elevada para la capacidad del sistema, al detenerse el flujo de oxígeno este se agotará de manera acelerada, lo que disminuyendo el tiempo de respuesta para actuar.

Efectos de una falla eléctrica en el sistema

- Pérdida de oxígeno: en caso de una falla la oxigenación puede detenerse y, al ser un sistema intensivo y cerrado, los peces consumirán aceleradamente el oxígeno disponible, lo que resulta que en menos de 30 minutos se puede agotar el mismo y derivar en la muerte de los peces.
- Acumulación de sólidos: en caso de que el sistema de filtración se detenga, se puede dar una acumulación de sólidos que puede resultar en el aumento de los niveles de amoníaco.
- Desestabilización de la temperatura: en caso de que el sistema RAS cuente con sensores y reguladores de temperatura, una falla eléctrica puede derivar en el aumento o la disminución de esta variable, lo que afecta negativamente a los peces y a los procesos del sistema RAS.

- Descompensación hidráulica del sistema: en caso de falla, las bombas que mantienen el sistema en funcionamiento pueden pararse, deteniendo la recirculación y acumulando el agua en algunos puntos específicos del sistema.

Medidas de prevención

- Sistemas de respaldo: se sugiere tener generadores eléctricos de emergencia, la conexión a una red de respaldo que sea estable y no presente fallas, o el uso de sistemas de baterías que pueden suministrar energía durante un periodo de emergencia. De estas medidas, la mejor son los generadores, ya que se pueden activar según la necesidad del sistema y no depender de externos.
- Uso de sistemas de respaldo de oxígeno: se recomienda tener en el sistema un cilindro de O₂ comprimido y una red de difusión independiente para poder usarlo en casos de emergencia para mantener los niveles de OD en los tanques. Esto se puede realizar de manera manual o automática al detectar la caída de la red.
- Uso de sensores de alarma: la implementación de dispositivos de alerta permite detectar la falla de manera inmediata. Estos sensores se activan al quedarse sin energía y las alertas que generan pueden verse en el sitio o recibirse de manera remota vía celular o correo electrónico.
- Protocolos de emergencia: es clave tener protocolos claros en cuanto a lo que se debe hacer en caso de una emergencia, así como capacitar e informar a los trabajadores acerca de estos. Así, en cuanto se presente una falla, se puede actuar al respecto y evitar la pérdida del cultivo.

Emergencias relacionadas con el agua del sistema

Factores que contribuyen a la dificultad de poseer agua disponible en el sistema

El éxito de la acuicultura radica en gran medida en la calidad del agua con la que cuenta el sistema.

- Fallas en la fuente de suministro: problemas relacionados con la fuente de agua, ya sea de pozo, río o de acueducto.
- Falta de mantenimiento de los equipos: las bombas que llevan el agua al sistema pueden fallar si no se les realiza mantenimiento, lo que da como resultado que el flujo de agua al sistema se detenga.
- Calidad del agua deficiente de la fuente de suministro: si la calidad del agua de la fuente no se verifica y comprueba que cumpla con lo requerido para el cultivo, los peces se verían afectados dado que podría contener altos niveles de metales pesados, pesticidas, microorganismos patógenos o incluso compuestos químicos tóxicos.

Efectos de la falta de agua en el sistema

- Acumulación de compuestos tóxicos: sin una fuente adecuada de agua no se pueden realizar los recambios requeridos para disminuir los niveles de nitratos, amonio, nitrito y otros desechos, lo cual resulta en un deterioro de la calidad del agua de los tanques y del sistema.
- Desequilibrio del sistema: la falta de recambio de agua puede generar fluctuaciones en todos los parámetros fisicoquímicos y crear condiciones adversas para los peces cultivados.
- Falta de respuesta ante emergencias: una de las maneras de actuar frente a una emergencia suele ser

realizar recambios parciales o totales para disminuir los contaminantes tóxicos, oxigenar el agua o disminuir los sólidos. En caso de no contar con una fuente hídrica adecuada, estas acciones de emergencia no podrán ser realizadas y, en consecuencia, se puede perder el cultivo.

Medidas de prevención

- Sistemas de almacenamiento de emergencia: debe tener un tanque de reserva de agua en las intermediaciones del sistema RAS, así como bombas para llevar el agua hasta el sistema. De esta forma, se tiene una fuente hídrica de respaldo en caso de que se presenten fallos en la fuente principal.
- Uso de sistemas de filtración: en caso de que el agua de la fuente presente una calidad deficiente, se recomienda el uso de filtros adecuados (mecánicos, biológicos o de desinfección) para la limpieza del agua, previo a la entrada en el sistema.
- Mantenimiento de bombas y equipos: la falta de mantenimientos preventivos puede generar daños en los equipos de bombeo, una correcta programación de mantenimiento puede evitar estos inconvenientes.
- Protocolos de emergencia: es primordial tener protocolos de emergencia que respondan a los problemas que puedan surgir y tener personal capacitado en la ejecución de estos, a fin de poder responder de la mejor manera posible y haciendo uso de los equipos y las medidas preventivas adecuadas.

Consideraciones adicionales

Los casos de emergencia pueden ocurrir en cualquier momento, por lo que la implementación de medidas preventivas y protocolos de contingencia es esencial para garantizar la continuidad y esta-

bilidad del cultivo. Contar con estas herramientas permite actuar de manera rápida y eficaz ante cualquier contratiempo, minimizando el impacto negativo en el sistema. La falta de estas medidas durante una crisis reduce drásticamente las posibilidades de supervivencia del cultivo, lo que puede derivar en un colapso del sistema y significativas pérdidas económicas, además de poner en riesgo los esfuerzos productivos a largo plazo. Por ello, la planificación adecuada y el mantenimiento constante son claves para asegurar la viabilidad de los sistemas acuícolas; sin estos elementos no se está preparado para enfrentar una crisis, por lo que puede haber riesgo de mortalidad de peces con las consecuentes pérdidas económicas.

PROSPECTIVAS

4

Retos de la acuicultura

La acuicultura se encuentra en un proceso de transición con el objetivo de lograr su intensificación y su expansión sostenibles para satisfacer la demanda mundial de alimentos acuáticos y distribuir de forma equitativa los beneficios (FAO, 2024). Para lograr este objetivo se tienen metas como el uso de tecnologías de gestión innovadoras que respalden la expansión de sistemas de acuicultura sostenibles y resilientes. Se requiere una visión integral del negocio, con una cobertura de toda la cadena de suministro, así como el seguimiento y la presentación de informes periódicos que cuantifiquen la eficiencia de los cultivos y sus repercusiones ecológicas, sociales y económicas.

Digitalización

La digitalización de la acuicultura está transformando profundamente el sector mediante la integración de tecnologías en todas las etapas del ciclo de producción, lo que permite mejorar las operaciones y tomar decisiones basadas en datos y evidencias. Al incrementar tanto la cantidad como la calidad de la información recopilada, los acuicultores pueden optimizar la gestión de sus procesos y hacer ajustes precisos para maximizar la productividad y sostenibilidad. Además, la digitalización facilita la conexión entre productores, proveedores de insumos, comerciantes y gobiernos, fortaleciendo las cadenas de valor y mitigando muchos de los desafíos que enfrenta la industria acuícola y,

al mismo tiempo, provee transparencia y trazabilidad de los productos y transacciones relacionadas (Rastegari et al., 2023).

Hay diferentes tipos de datos de interés, como los datos geoespaciales, obtenidos con sistemas de información geográfica (GIS – Geographic Information Systems) y teledetección, que permiten identificar sitios adecuados para el cultivo a través de mapas temáticos. Así mismo, los datos de calidad ambiental, como la calidad del agua y la idoneidad del suelo, son cruciales para garantizar prácticas sostenibles. Otros datos de interés se miden durante la producción a través de herramientas como alimentadores automáticos y sistemas de monitoreo recopilan datos en tiempo real para mejorar la eficiencia y el uso de recursos. Por último, en la comercialización, las plataformas digitales analizan datos de mercado relacionados con tendencias, preferencias y precios, agregando valor al producto final (Pratiwy et al., 2022).

El acceso global a información digitalizada no solo permite una mejor toma de decisiones, sino que el desarrollo de modelos integrales y plataformas para el análisis de la información también apoya el desarrollo empresarial de pequeños y medianos productores, dándoles herramientas para mejorar sus prácticas y aumentar su competitividad. La disponibilidad de datos en tiempo real permite a los acuicultores reaccionar más rápidamente ante cambios en las condiciones del agua, la salud de

los peces y otros parámetros críticos como la inversión en alimento, transformación y transporte entre otros, lo que permite una gestión más eficiente y menos riesgos para la producción.

Para que esta transformación productiva sea viable, es necesario disponer de información depurada y representativa, es decir, datos que reflejen de manera precisa el comportamiento del sistema acuícola y que sean fáciles de interpretar. La calidad de los datos es crucial para asegurar que las decisiones se basen en información confiable y actualizada. Además, es esencial invertir en programas que promuevan la alfabetización digital, especialmente entre acuicultores de todos los niveles productivos, facilitando el acceso a herramientas tecnológicas avanzadas. Este enfoque inclusivo es promovido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO - Food and Agriculture Organization), a través de su programa de Transformación Azul, que busca facilitar la inversión en innovaciones digitales, tecnológicas y de gestión para apoyar la expansión de la acuicultura (Akerkar y Hong, 2021).

En respuesta a esta necesidad, se han implementado programas de mejora en la recopilación y el uso de la información, como es el caso del proyecto “Buna África”. Esta iniciativa, desarrollada por la Universidad de Rhodes en Sudáfrica, tiene como objetivo facilitar el envío de datos de los productores al gobierno mediante una plataforma digital

que centraliza la información. El objetivo es que estos datos sean utilizados para fundamentar políticas públicas, formular planes de gestión y mejorar el desarrollo del sector acuícola. Además, con el apoyo de la FAO, se planea implementar esta plataforma en Ruanda y Uganda, ampliando la red de información y permitiendo que los productores reciban apoyo técnico y accedan a servicios esenciales que incrementen la eficiencia y producción (FAO, 2024). El uso de plataformas digitales y aplicaciones está acelerando la transformación de la acuicultura, especialmente en países en desarrollo, eliminando obstáculos que dificultan el acceso a tecnología y conocimientos.

Innovaciones tecnológicas

Tecnologías como las aplicaciones móviles, el internet de las cosas (IoT), el análisis de macrodatos y la inteligencia artificial (IA) están revolucionando la comercialización al proporcionar datos en tiempo real, automatización de procesos y un seguimiento preciso de la producción, mientras que los sistemas de pago digital facilitan las transacciones comerciales y reducen los costos operativos (Akerkar et al., 2021).

En los países en desarrollo, estas innovaciones están eliminando barreras importantes en la recopilación, difusión y uso de datos, lo que acelera el crecimiento y la profesionalización del sector. Por ejemplo, los acuicultores pueden ahora beneficiarse de plataformas móviles para gestionar sus operaciones, acceder a mercados internacionales y

establecer mejores conexiones con proveedores de insumos y servicios.

Además, el uso de sensores inteligentes ha permitido medir de manera constante parámetros fisicoquímicos críticos, como la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto, que son esenciales para mantener condiciones óptimas en los sistemas de recirculación acuícola. Por otra parte, al uso de cámaras y sistemas de visión artificial, integrados con IA, permiten un análisis detallado del crecimiento del cultivo, ayudando a ajustar la alimentación y detectar cualquier anomalía en el comportamiento o la salud de los peces. Estas tecnologías no solo proporcionan datos en tiempo real, sino que permiten a los productores automatizar procesos clave, mejorar el bienestar de los peces y aumentar la productividad (Yang et al., 2020).

Toda esta información se puede integrar en plataformas de análisis avanzadas y compartir estos datos a nivel mundial, a través de plataformas digitales, facilita la colaboración internacional, el acceso a nuevos conocimientos y la comparación de resultados con estándares globales. Esto contribuye no solo a mejorar las condiciones de cultivo, sino también a identificar mejores prácticas y adoptar soluciones innovadoras basadas en la experiencia global (Wang et al., 2021).

Modelado y control de los sistemas RAS

El modelado y control automático de los sistemas de recirculación acuícola (RAS) han demostrado

ser herramientas fundamentales para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad de la producción acuícola. Estas tecnologías permiten una mejor gestión de los sistemas RAS al proporcionar simulaciones precisas y mecanismos de control en tiempo real que aseguran condiciones óptimas para el cultivo de especies acuáticas (Khater et al., 2021).

Beneficios del modelado

El uso de modelos matemáticos y simulaciones en los sistemas RAS permite anticipar comportamientos y optimizar las condiciones de cultivo. A través del modelado, los acuicultores pueden simular diversos escenarios de operación, como cambios en la temperatura, oxígeno disuelto o la carga de alimentación, para prever cómo estas variables afectarán la calidad del agua y el bienestar de los peces, así como su crecimiento, conversión alimenticia y tiempo estimado de los ciclos de cultivo hasta que los peces alcancen la talla comercial (Kamali et al., 2022).

Entre los principales beneficios del modelado se encuentran:

- Optimización del uso de recursos: el modelado permite predecir la demanda de oxígeno, el consumo de alimento, el ciclo de nitrificación en el biofiltro, la concentración de amoníaco, el pH del sistema e incluso el crecimiento de los peces. Esto ayuda a optimizar la cantidad de insumos necesarios, lo que se traduce en ahorros significativos en costos operativos.

- **Mejor toma de decisiones:** gracias a la capacidad de predecir el comportamiento del sistema, los productores pueden tomar decisiones más informadas y basadas en datos. Por ejemplo, el modelado puede ayudar a determinar el momento óptimo para realizar recambios de agua, ajustar la cantidad de alimento suministrado o predecir el peso de los peces en el tiempo para una mejor planeación del uso del sistema.
- **Reducción de riesgos:** los modelos pueden simular emergencias como fallos en la oxigenación o picos de amoníaco, lo que permite preparar respuestas más eficaces y evitar la pérdida de cultivos.
- **Sostenibilidad:** el uso eficiente de recursos, como el agua y la energía, se traduce en una reducción del impacto ambiental, lo que hace que los sistemas RAS sean más sostenibles a largo plazo.

Además, la capacidad de integrar modelos de crecimiento de peces con los de calidad del agua permite a los acuicultores mantener condiciones óptimas que promuevan un crecimiento saludable y eficiente.

Control automático de parámetros

El desarrollo de modelos tiene ventajas adicionales como la posibilidad de implementar un control automático de parámetros, lo que llevaría a un concepto avanzado denominado acuicultura de precisión. Gracias a la integración de tecnologías como el IoT, los sensores inteligentes y el uso de algoritmos predictivos, este proceso ha mejorado y los acuicultores pueden supervisar y ajustar automáticamente variables críticas como la temperatura, el

pH, el oxígeno disuelto y los niveles de nitratos y amoníaco (Kamali et al., 2023).

Los sistemas de control automático operan mediante la recopilación constante de datos a través de sensores instalados en los tanques de cultivo. Estos datos son procesados por un sistema central que ajusta los parámetros según sea necesario, al modificar variables de operación como pueden ser el flujo de agua del sistema, el flujo de oxígeno, la cantidad de soluciones de control de pH y alcalinidad, la rotación del filtro tambor, la tasa de recambio, entre otros, lo que evita situaciones de riesgo para los peces y optimiza el rendimiento del sistema. Los principales beneficios del control automático de parámetros incluyen:

- **Monitoreo continuo en tiempo real:** los sensores instalados en el sistema permiten un monitoreo constante de los parámetros clave, lo que garantiza que cualquier desviación de los niveles óptimos sea detectada y corregida de inmediato.
- **Mejora de la precisión y eficiencia:** el control automático reduce los errores humanos y garantiza una mayor precisión en el manejo de los parámetros del sistema, lo que se traduce en mejores condiciones de cultivo y en un menor riesgo de enfermedades o mortalidad en los peces.
- **Ahorro de tiempo y recursos:** al automatizar los procesos de monitoreo y ajuste, los acuicultores pueden ahorrar tiempo y recursos que de otro modo se gastarían en supervisión manual y ajustes constantes del sistema.

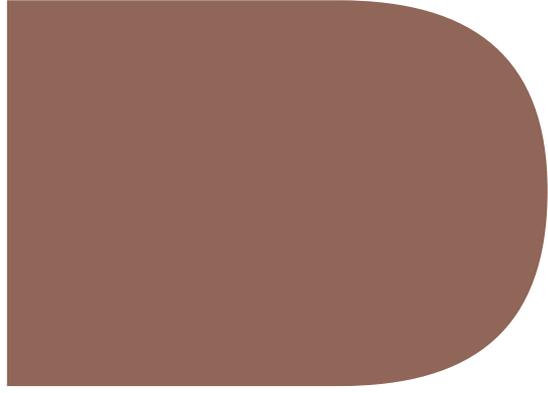
- Adaptabilidad: los sistemas automatizados pueden adaptarse a cambios en el entorno, como variaciones de temperatura o fluctuaciones en la calidad del agua, ajustando automáticamente los parámetros para mantener el equilibrio del sistema.

CONCLUSIONES



El futuro de la acuicultura se vislumbra lleno de oportunidades gracias a la integración de tecnologías avanzadas, la digitalización del sector y la implementación de sistemas que mejoran la productividad y la sostenibilidad. El modelado y control automático de los sistemas RAS, junto con la globalización de la información, permiten a los productores acuícolas optimizar sus operaciones de manera sostenible, garantizando altos rendimientos y un uso eficiente de los recursos. Además, la adopción de innovaciones tecnológicas, como el internet de las cosas y la inteligencia artificial, promete mejorar aún más la precisión y capacidad de respuesta en la gestión de los cultivos. A medida que la acuicultura se adapta a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda mundial de alimentos, estas herramientas serán esenciales para impulsar la competitividad, sostenibilidad y resiliencia de la industria. Al fomentar la inversión en tecnología y educación, así como la colaboración global, se estará construyendo una acuicultura más sólida y capaz de garantizar la inocuidad y seguridad alimentaria de las generaciones futuras.

REFERENCIAS



- Ahmed, N., Thompson, S. y Glaser, M. (2019). Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. *Environmental Management*, 63(2), 159-172. <https://doi.org/10.1007/S00267-018-1117-3/TABLES/3>
- Ahmed, N. y Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>
- Akerkar, R. y Hong, M. (2021). *Big Data in Aquaculture Opportunities and challenges for Sogn og Fjordane region. VESTLANDSFORSKING.*
- Albrektsen, S., Kortet, R., Skov, P. V., Ytteborg, E., Gitlesen, S., Kleinegris, D., Mydland, L., Hansen, J. Ø., Lock, E., Mørkøre, T., James, P., Wang, X., Whitaker, R. D., Vang, B., Hatlen, B., Daneshvar, E., Bhatnagar, A., Jensen, L. B. y Øverland, M. (2022). Future feed resources in sustainable salmonid production: A review. *Reviews in Aquaculture*, 14(4), 1790-1812. <https://doi.org/10.1111/raq.12673>
- Aquamerik. (2024). *Parabolic screen filters.* <https://www.aquamerik.com/boutique/parabolic-screen-filters/?lang=en>
- AUNAP (2024). *DANE: Sector de pesca y acuicultura del país crece un 37%.* AUNAP. <https://www.aunap.gov.co/dane-sector-de-pesca-y-acuicultura-del-pais-crece-un-37/>
- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P. y Mendiola, D. (2018). Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering*, 81, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.AQUAENG.2018.03.003>
- Balmoral Tanks (2022). *Guide to Specifying RAS Tanks.* <https://www.balmoraltanks.com/information/commentary/317-specifying-ras-fish-farming-tanks>

- Bao, W., Zhu, S., Jin, G. y Ye, Z. (2019). Generation, characterization, perniciousness, removal and reutilization of solids in aquaculture water: A review from the whole process perspective. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 1342-1366. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12296>
- Bregnballe, J. (2022). *A guide to recirculation aquaculture* FAO.
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z., Xiong, S. y Diana, J. (2007). Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 14(7), 452-462. <https://doi.org/10.1065/ESPR2007.05.426/METRICS>
- Chen, W. y Gao, S. (2023). Current status of industrialized aquaculture in China: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 32278-32287. <https://doi.org/10.1007/S11356-023-25601-9/FIGURES/6>
- Davidson, J., May, T., Good, C., Waldrop, T., Kenney, B., Terjesen, B. F. y Summerfelt, S. (2016). Production of market-size North American strain Atlantic salmon *Salmo salar* in a land-based recirculation aquaculture system using freshwater. *Aquacultural Engineering*, 74, 1-16. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2016.04.007>
- de Jesus Gregersen, K. J., Pedersen, L. F., Pedersen, P. B., Syropoulou, E. y Dalsgaard, J. (2021). Foam fractionation and ozonation in freshwater recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 95, 102195. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2021.102195>
- Dongdong, Y., Qi, N., Baolu, Z., Yulei, Z., Jianjun, S., Chongwu, G., Chenglin, Z., Fan, W., Dongdong, Y., Qi, N., Baolu, Z., Yulei, Z., Jianjun, S., Chongwu, G., Chenglin, Z. y Fan, W. (2014). Effect in water purification by airlift sand filter in aquaculture system. *Transactions of the Chinese Society of Agri-*

- cultural Engineering (Transactions of the CSAE, 30(5), 57-64. <https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1002-6819.2014.05.008>*
- Ebeling, J. M. y Timmons, M. B. (2012). Recirculating Aquaculture Systems. *Aquaculture Production Systems*, 245-277. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch11>
- Fantini-Hoag, L., Hanson, T. y Chappell, J. (2022). Production trials of in-pond raceway system growing stocker and foodsize hybrid Catfish plus Nile tilapia. *Aquaculture*, 561, 738582. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2022.738582>
- FAO (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción*. FAO. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cdo683es>
- Fedeacua (2023). La celebración de nuestros acuicultores, (Vol. 12). https://fedeacua.org/files/acuicultores_12_.PDF
- Fernandes, P., Pedersen, L. F. y Pedersen, P. B. (2015). Microscreen effects on water quality in replicated recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 65, 17-26. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2014.10.007>
- Freitas de Oliveira, F., Moreira, R. G. y Schneider, R. P. (2019). Evidence of improved water quality and biofilm control by slow sand filters in aquaculture – A case study. *Aquacultural Engineering*, 85, 80-89. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2019.03.003>
- Fresh by Design (2024). *HRAP Raceway Aquaculture Tanks*. <https://freshbydesign.com.au/aquaponic-aquaculture-products/aquaculture-tanks/hrap-raceway-aquaculture-tanks/>
- Gichana, Z. M., Liti, D., Waidbacher, H., Zollitsch, W., Drexler, S. y Waikibia, J. (2018). Waste management in recirculating aquaculture system throu-

- gh bacteria dissimilation and plant assimilation. *Aquaculture International*, 26(6), 1541-1572. <https://doi.org/10.1007/S10499-018-0303-X>
- Godoy-Olmos, S., Martínez-Llorens, S., Tomás-Vidal, A., Monge-Ortiz, R., Estruch, G. y Jover-Cerdá, M. (2019). Influence of temperature, ammonia load and hydraulic loading on the performance of nitrifying trickling filters for recirculating aquaculture systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103257. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2019.103257>
- Hashibur, R., Mohammad Mahfujul, H., Mohammad Ashraful, A. y Flura, F. (2022). A Study on the Specific Growth Rate (SGR) at different stages of tilapia (*Oreochromis niloticus*) production cycle in tank based aquaculture system. *International Journal of Aquaculture and Fishery Sciences*, 8(2), 059-065. <https://doi.org/10.17352/2455-8400.000079>
- Ibrahim, L. A., Shaghaleh, H., El-Kassar, G. M., Abu-Hashim, M., Elsadek, E. A. y Alhaj Hamoud, Y. (2023). Aquaponics: A sustainable path to food sovereignty and enhanced water use efficiency. *Water*, 15(24), 4310. <https://doi.org/10.3390/W15244310>
- Kamali, S., Ward, V. C. A. y Ricardez-Sandoval, L. (2022). Dynamic modeling of recirculating aquaculture systems: Effect of management strategies and water quality parameters on fish performance. *Aquacultural Engineering*, 99, 102294. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102294>
- Kamali, S., Ward, V. C. A. y Ricardez-Sandoval, L. (2023). Closed-loop operation of a simulated recirculating aquaculture system with an integrated application of nonlinear model predictive control and moving horizon estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209, 107820. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107820>

- Khater, E.-S., Bahnasawy, A., El-Ghobashy, H., Shaban, Y., Elsheikh, F., El-Reheem, S. A. y Aboegela, M. (2021). Mathematical model for predicting oxygen concentration in tilapia fish farms. *Scientific Reports*, 11(1), 24130. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03604-1>
- Kovács, B. D., de Jesus Gregersen, K. J., Rüppel, F., von Danwitz, A. y Pedersen, L. F. (2023). Evaluating protein skimmer performance in a commercial seawater recirculating aquaculture system (RAS). *Aquacultural Engineering*, 103, 102369. <https://doi.org/10.1016/j.AQUAENG.2023.102369>
- Kurtela, Ž. y Komadina, P. (2010). Application of hydrocyclone and uv radiation as a ballast water treatment method. *Promet - Traffic and Transportation*, 22(3), 183-191. <https://doi.org/10.7307/PTT.V22I3.274>
- Lam, H. M., Remais, J., Fung, M. C., Xu, L. y Sun, S. S. M. (2013). Food supply and food safety issues in China. *Lancet*, 381(9882), 2044-2053. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60776-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60776-X)
- Lee, J. (2015). Practical applications of low-pressure hydrocyclone (LPH) for feed waste and fecal solid removal in a recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*, 69, 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.AQUAENG.2015.08.003>
- Lekang, O.-Ivar. (2020). *Aquaculture Engineering*. https://books.google.com/books/about/Aquaculture_Engineering.html?hl=es&id=UN-2DwAAQBAJ
- Leonard, J. N. y Skov, P. V. (2022). Capacity for thermal adaptation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): Effects on oxygen uptake and ventilation. *Journal of Thermal Biology*, 105, 103206. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103206>
- Linbo, T. L. (2009). *Zebrafish (Danio rerio) husbandry and colony maintenance at the Northwest Fish-*

- ries Science Center. <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/3645>
- Liu, X., Steele, J. C. y Meng, X.-Z. (2017). Usage, residue, and human health risk of antibiotics in Chinese aquaculture: A review. *Environmental Pollution*, 223, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.003>
- Lu, G. L., Jiang, B., Li, Z. C. y Li, A. X. (2022). Ultraviolet light and ozone controls Cryptocaryon irritans infection in factory aquaculture. *Aquaculture*, 548, 737598. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2021.737598>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Samba, P. y Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1-11. <https://doi.org/10.4081/IJA.2017.1012>
- Milijasevic, M., Veskovic-Moracanic, S., Babic Milijasevic, J., Petrovic, J. y Nastasijevic, I. (2024). Antimicrobial resistance in aquaculture: Risk mitigation within the one health context. *Foods*, 13(15), 2448. <https://doi.org/10.3390/FOODS13152448>
- Minagricultura (2021). *Indicadores Sectoriales. Cadena de la acuicultura*. Minagricultura <https://sioc.minagricultura.gov.co/Acuicultura/Pages/Documentos.aspx>
- Mithuna, R., Tharanyalakshmi, R., Jain, I., Singhal, S., Sikarwar, D., Das, S., Ranjitha, J., Ghosh, D., Rahman, M. M. y Das, B. (2024). Emergence of antibiotic resistance due to the excessive use of antibiotics in medicines and feed additives: A global scenario with emphasis on the Indian perspective. *Emerging Contaminants*, 10(4), 100389. <https://doi.org/10.1016/J.EMCON.2024.100389>
- Mook, W. T., Chakrabarti, M. H., Aroua, M. K., Khan, G. M. A., Ali, B. S., Islam, M. S. y Abu Hassan, M. A. (2012).

- Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. *Desalination*, 285, 1-13. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2011.09.029>
- Murray, F., Bostock, J. y Fletcher, M. (2014). *Review of RAS technologies and their commercial application. Final report*. University of Stirling Aquaculture. <http://dspace.stir.ac.uk/handle/1893/21109>
- Pfeiffer, T., Baptiste, R. y Wills, P. S. (2024). Fine-solids removal by foam fractionation in a low-salinity marine recirculating aquaculture system (RAS). *North American Journal of Aquaculture*, 86(3), 345-354. <https://doi.org/10.1002/NAAQ.10345>
- Piza Jerez, A. C. (2024). *Aquaculture in Colombia: Current Affairs in 2024*. World Aquaculture Society. https://www.was.org/article/Aquaculture_in_Colombia_Current_Affairs_in_2024.aspx
- Pratiwy, F. M., Cahya, M. D. y Andriani, Y. (2022). Digitization of aquaculture: A review. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 10(1), 18-22. <https://doi.org/10.22271/FISH.2022.V10.11A.2623>
- Preena, P. G., Rejish Kumar, V. J. y Singh, I. S. B. (2021). Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: The processes and players. *Reviews in Aquaculture*, 13(4), 2053-2075. <https://doi.org/10.1111/raq.12558>
- Pulkkinen, J. T., Eriksson-Kallio, A. M., Aalto, S. L., Tirola, M., Koskela, J., Kiuru, T. y Vielma, J. (2019). The effects of different combinations of fixed and moving bed bioreactors on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) growth and health, water quality and nitrification in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 85, 98-105. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2019.03.004>

- Qi, W., Skov, P. V., de Jesus Gregersen, K. J., Mousavi, S., Pedersen, L. F. y Mota, V. C. (2025). Estimating biofilm activity on biofilter elements in recirculating aquaculture systems (RAS) for rearing Atlantic salmon parr (*Salmo salar*) during operation with ozone and peracetic acid. *Aquaculture*, 594, 741381. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2024.741381>
- Rahman, A., Kanon, K. F., Islam, Md. J., Mojumdar, S., Ashik, A.-A. y Molla, M. H. R. (2022). Impacts of climate change on aquaculture and fisheries: An integrated approach for adaptation and mitigation. *Journal of Biological Studies*, 5(1), 171-188. <https://doi.org/10.62400/JBS.V5I1.6623>
- Randall, D. J. y Tsui, T. K. N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1-12), 17-23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)
- Rastegari, H., Nadi, F., Lam, S. S., Ikhwanuddin, M., Kasan, N. A., Rahmat, R. F. y Mahari, W. A. W. (2023). Internet of Things in aquaculture: A review of the challenges and potential solutions based on current and future trends. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100187. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2023.100187>
- Reijnen, J. (2022). *How does a sand filter work?* <https://royalbrinkman.com/knowledge-center/technical-projects/water-filter-technologies-horticulture/sand-filter>
- Rodríguez, D. (2023). Emergencia sanitaria golpea el bolsillo del sector piscícola en Colombia. *Portafolio*. <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/emergencia-sanitaria-golpea-el-bolsillo-del-sector-piscicola-en-colombia-584943>
- Rodríguez-Leal, S., Silva-Acosta, J., Marziales, T. y Gallardo-Rodríguez, J. J. (2023). Lab- and pilot-scale photo-biofilter performance with algal-bacterial beads in a recirculation aquaculture system for

- rearing rainbow trout. *Journal of Applied Phycology*, 35(4), 1673-1683. <https://doi.org/10.1007/S10811-023-02981-6/TABLES/5>
- Ruiz, P., Vidal, J. M., Sepúlveda, D., Torres, C., Villouta, G., Carrasco, C., Aguilera, F., Ruiz-Tagle, N. y Urrutia, H. (2020). Overview and future perspectives of nitrifying bacteria on biofilters for recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 12(3), 1478-1494. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12392>
- Sanders, J. (2024). *Ammonia Toxicity in Fish*. <https://cafish-vet.com/water-quality/ammonia-toxicity-in-fish/>
- Sarosh, S., Kulkarni, R. M., Varma, E., Sirivibha, S. P. y Ramaswami, S. (2024). Recirculating Aquaculture System and Nitrification: A Review. *Journal of the Indian Institute of Science* 2024, 1-24. <https://doi.org/10.1007/S41745-024-00443-7>
- Setiadi, E., Taufik, I., Widyastuti, Y. R., Ardi, I. y Saputra, A. (2019). Different substrate of trickling filter on growth, survival rate, and water quality of common carp (*Cyprinus carpio*) cultivation by using an intensive recirculation system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 236(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/236/1/012027>
- Shitu, A., Liu, G., Muhammad, A. I., Zhang, Y., Tadda, M. A., Qi, W., Liu, D., Ye, Z. y Zhu, S. (2022). Recent advances in application of moving bed bioreactors for wastewater treatment from recirculating aquaculture systems: A review. *Aquaculture and Fisheries*, 7(3), 244-258. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.006>
- Singh, P., Gulati, R., Singh, G., Luwanshi, A., Sharma, R. y Kumar, R. (2022). Working and construction status of recirculatory aquaculture (RAS) farms in Haryana. *The Pharma Innovation Journal*, 11(12), 5928-5933. <https://www.thepharmajournal.com/>

archives/?year=2022&vol=11&issue=12&ArticleId=18208

- Song, K., Mohseni, M. y Taghipour, F. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review. *Water Research*, 94, 341-349. <https://doi.org/10.1016/j.WATRES.2016.03.003>
- Subramanian, S., Sumares, B. y Tahi, F. (2020). *Biosecurity 101: Keys to keeping your RAS pathogen-free*. <https://www.rastechmagazine.com/biosecurity-101-keys-to-keeping-your-ras-pathogen-free/>
- Supriyono, E., Adiyana, K. y Thesiana, L. (2023). A Study of Environmentally Friendly Recirculating Aquaculture System on Lobster *Panulirus homarus* Nursery. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(5), 1-7. <https://doi.org/10.15244/pjoes/166596>
- Suyamud, B., Chen, Y., Quyen, D. T. T., Dong, Z., Zhao, C. y Hu, J. (2024). Antimicrobial resistance in aquaculture: Occurrence and strategies in Southeast Asia. *The Science of the Total Environment*, 907. <https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2023.167942>
- Timmons, M. B., Holder, J. L. y Ebeling, J. M. (2006). Application of microbead biological filters. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.AQUAENG.2005.07.003>
- Uyğun, M., Firat, M. K., Antepli, O., Bulat, F. N., Hekimoğlu, M. A., Bağcı, M. K., Güleç, F., Suzer, C., Köse, İ., Saka, Ş. y Kılınc, B. (2023). The Water Disinfection with Different Type UV Lamp Systems on Bacterial Load in Small Scale Recirculating Aquaculture Systems. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(1), 23785. <https://doi.org/10.4194/TRJFAS23785>
- Valenzuela Vargas, R., Martínez, P. y Arévalo, J. J. (2017). Evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en

- la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Ingeniería y Región*, 18, 25-33. <https://doi.org/10.25054/22161325.1737>
- Varga, M., Csukas, B. y Kucska, B. (2020). Implementation of an easily reconfigurable dynamic simulator for recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 90, 102073. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2020.102073>
- Wang, C., Li, Z., Wang, T., Xu, X., Zhang, X. y Li, D. (2021). Intelligent fish farm—the future of aquaculture. *Aquaculture International*, 29(6), 2681-2711. <https://doi.org/10.1007/S10499-021-00773-8>
- Welker, T. L., Lim, C., Yildirim-Aksoy, M. y Klesius, P. H. (2012). Susceptibility of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed with dietary sodium chloride to nitrite toxicity. *Aquaculture International*, 20(1), 159-176. <https://doi.org/10.1007/S10499-011-9449-5/METRICS>
- Xiao, R., Wei, Y., An, D., Li, D., Ta, X., Wu, Y. y Ren, Q. (2019). A review on the research status and development trend of equipment in water treatment processes of recirculating aquaculture systems. *Reviews in Aquaculture*, 11(3), 863-895. <https://doi.org/10.1111/raq.12270>
- Yang, L., Liu, Y., Yu, H., Fang, X., Song, L., Li, D. y Chen, Y. (2020). Computer vision models in intelligent aquaculture with emphasis on fish detection and behavior analysis: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 2785-2816. <https://doi.org/10.1007/S11831-020-09486-2>
- Yu, Y. Bin, Choi, J. H., Lee, J. H., Jo, A. H., Lee, K. M. y Kim, J. H. (2023). Biofloc Technology in Fish Aquaculture: A Review. *Antioxidants*, 12(2), 398. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX12020398>
- Zhang, J., Liu, H., Yao, J., Cao, S., Liu, X., Cheng, G., Hu, Q., Wang, F. y Zhang, Z. (2024). Hydrodyna-

mic characteristics analysis of series hydraulic cyclone separators for pond aquaculture wastewater purification. *Aquacultural Engineering*, 106, 102436. <https://doi.org/10.1016/j.AQUAENG.2024.102436>

Zimmermann, S., Kiessler, A. y Zhang, J. (2023). The future of intensive tilapia production and the circular bioeconomy without effluents: Biofloc technology, recirculation aquaculture systems, bio-RAS, partitioned aquaculture systems and integrated multitrophic aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 15(S1), 22-31. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12744>