

GUÍA DEL SECTOR

ACUICULTURA

**CORRECTA GESTIÓN DE LAS
AGUAS RESIDUALES EN EL
SECTOR AGROINDUSTRIAL
PARA BID INVEST**



Título y referencia	Guía del sector – Acuicultura	Versión final
Cliente	João Paulo Diniz Abud..... Natazha Valarezo..... Paula Valencia.....	jdinizabud@iadb.org natazhav@iadb.org paulava@iadb.org
Preparado por	Mauricio Morera, Wastewater Expert..... Mónica Salas, Wastewater Expert.....	ma.morera@gmail.com msalas@auroraingenieria.com
Aprobado por	Natalia Benavides, Senior Consultant, Futuris..... Emma Tristán, General Director, Futuris.....	natalia@futurisconsulting.com emma@futurisconsulting.com
Contacto Futuris	Futuris Consulting S.A..... Tres Ríos, Cartago, Costa Rica.....	@ http://www.futurisconsulting.com +506 2279-3501

Copyright © [2024] Corporación Interamericana de Inversiones (BID Invest). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO. Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento a BID Invest.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI, vigente en el momento de la disputa. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras de BID Invest que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI), vigentes en el momento de la disputa. El uso del nombre de BID Invest para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Nótese que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

ACLARACIÓN

Este informe ha sido elaborado por Futuris Consulting S.A. con toda la pericia, cuidado y diligencia razonables de acuerdo con los términos del Contrato con el cliente, incorporando nuestras Estipulaciones y Condiciones Generales de Trabajo y teniendo en cuenta los recursos según lo acordado con el cliente. Declinamos toda responsabilidad ante el cliente o terceros con respecto a cualquier asunto que quede fuera del ámbito del encargo, tal y como se define en el Contrato con el cliente. Este informe es confidencial para el cliente y para los terceros específicamente indicados por acuerdo escrito entre Futuris Consulting S.A. y el cliente.

No aceptamos ninguna responsabilidad, de la naturaleza que sea, frente a terceros a los que se dé a conocer este informe, o partes del mismo. Queda a la entera discreción de dichos terceros atenerse o no al informe y confiar en él.

Índice de Contenidos

1

Introducción

1.1

Guía del sector y Nota de Buenas Prácticas(NBP).....

5

1.2

Fuentes de información.....

5

2

Características del Sector y Producción de Aguas Residuales

2.1

Panorama general del sector.....

6

2.2

Uso del agua en el proceso industrial.....

7

2.3

Revisión general de la generación de aguas residuales.....

10

2.4

Descripción de la calidad del agua residual

10

3

Mejores Prácticas de Gestión de Aguas Residuales (MPGAR)

3.1

MPGAR para Prevención de la contaminación

12

3.2

Tratamiento de aguas residuales

14

3.3

Ejemplo de tratamiento de aguas residuales

16

3.4

Indicadores clave de desempeño y monitoreo.....

16

4

Referencias

Siglas

BID	Banco Interamericano de Desarrollo
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GBM	Grupo del Banco Mundial
ISO	Organización Internacional de Normalización
LAC	Latinoamérica y el Caribe
MO	Materia orgánica
MPGAR	Mejores prácticas de gestión de aguas residuales
NBP	Nota de buenas prácticas
SDT	Sólidos disueltos totales
SRA	Sistemas de recirculación de acuicultura
SST	Sólidos suspendidos totales

7

Introducción



1.1 GUÍA DEL SECTOR Y NOTA DE BUENAS PRÁCTICAS (NBP)

Esta guía del sector se ha elaborado como complemento de la Nota de Buenas Prácticas (NBP) para la gestión de aguas residuales en el sector agroindustrial¹. En las siguientes secciones se ha hecho referencia a la NBP para reducir la duplicación, siempre que la información de la NBP complemente lo que se presenta en esta guía del sector.

El presente documento proporciona una visión general integral de las mejores prácticas de gestión de aguas residuales (MPGAR) para gestionar los impactos ambientales de las aguas residuales de la acuicultura, ayudando a las empresas a garantizar el cumplimiento de las regulaciones pertinentes y a promover prácticas sostenibles que protejan la salud pública y el ambiente. En la Sección 2 se describen las características del sector y en la Sección 3 las MPGAR, incluidas las MPGAR de prevención de la contaminación (Sección 3.1) y las MPGAR de tratamiento de aguas residuales (Sección 3.2).

La información relativa a los indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés) está vinculada a los marcos regulatorios específicos de cada país, y esta información se puede encontrar en la Sección 2 y el Anexo I de la NBP.

Para información más detallada de los ejemplos de prevención de la contaminación y MPGAR en el tratamiento de aguas residuales, consulte la Sección 4 y la Sección 5 de la NBP, respectivamente. En la Sección 6 de la NBP se puede encontrar información más detallada sobre el monitoreo.

1.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Esta guía del sector sobre las aguas residuales de la acuicultura se ha desarrollado utilizando varias fuentes de información. Principalmente, se basa en el Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación del Banco Mundial (1998), que constituye el marco subyacente de las directrices más especializadas de la industria, conocidas como Directrices sobre el Medio Ambiente, la Salud y la Seguridad para la Acuicultura, publicadas por el Grupo del Banco Mundial en 2007. En la Sección 4 está disponible una recopilación completa de referencias. Además, se han incorporado ideas provenientes de entrevistas con clientes de BID Invest.

2

Características del Sector y Producción de Aguas Residuales



2.1 PANORAMA GENERAL DEL SECTOR

La acuicultura, a menudo denominada agricultura acuática, es equivalente a la agricultura o ganadería terrestre. Al igual que la agricultura, engloba el cultivo de animales mediante la cría y el cultivo de plantas través de disciplinas como la agronomía, la horticultura y la silvicultura. La acuicultura implica el cultivo de organismos acuáticos e incluye diversos animales, como crustáceos, peces con aletas, moluscos, y plantas como algas marinas y macrófitos de agua dulce.

En la acuicultura, la crianza consiste en intervenir activamente el proceso de cría para mejorar la producción. Incluye la repoblación, la alimentación y la protección de los organismos acuáticos frente a los depredadores. También significa que los individuos o las empresas son propietarios de las poblaciones cultivadas. Si los organismos acuáticos son accesibles al público como recursos de propiedad común, con o sin licencias, se consideran parte de la pesca y no de la acuicultura. La maricultura, o acuicultura marina, tiene lugar en el mar durante todo el ciclo o únicamente durante la fase de crecimiento. En el primer caso, el ciclo de producción se desarrolla íntegramente en el mar para aquellas especies que dependen de las semillas silvestres del mar, por ejemplo, los mejillones. La acuicultura costera, que suele practicarse en estanques construidos en tierra o en zonas intermareales, desempeña un papel importante en los medios de subsistencia, el empleo y el desarrollo económico de las comunidades costeras.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)², la producción

total de la pesca y la acuicultura alcanzó la cifra récord de 214 millones de toneladas en 2020, de las cuales 178 millones correspondieron a animales acuáticos y 36 millones a algas, debido en gran parte al crecimiento de la acuicultura, particularmente en Asia. En la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC), la contribución a la producción acuícola mundial fue de 2.275,5 mil toneladas en el mismo año. Chile emergió como un actor destacado, representando el 34% de la producción acuícola de LAC durante 2020, seguido por Ecuador, Brasil, Perú y México.

Las aguas residuales de la acuicultura plantean problemas ambientales significativos, mayoritariamente por la contaminación del agua y el agotamiento de las poblaciones de peces salvajes³. La presencia de componentes orgánicos en los efluentes acuícolas, tales como alimentos no consumidos y heces, puede provocar la degradación ambiental de los cuerpos de agua receptores y de los sedimentos. Las aguas residuales de la acuicultura contienen materia orgánica disuelta y particulada (MO), sólidos disueltos totales (SDT) y nutrientes como el fósforo (P) y el nitrógeno (N), que pueden tener efectos perjudiciales para el crecimiento de los peces y causar problemas ambientales⁴.

2.2 USO DEL AGUA EN EL PROCESO INDUSTRIAL

La acuicultura abarca el cultivo de organismos acuáticos en tres medios acuáticos distintos: agua dulce, agua salobre y agua de mar. La

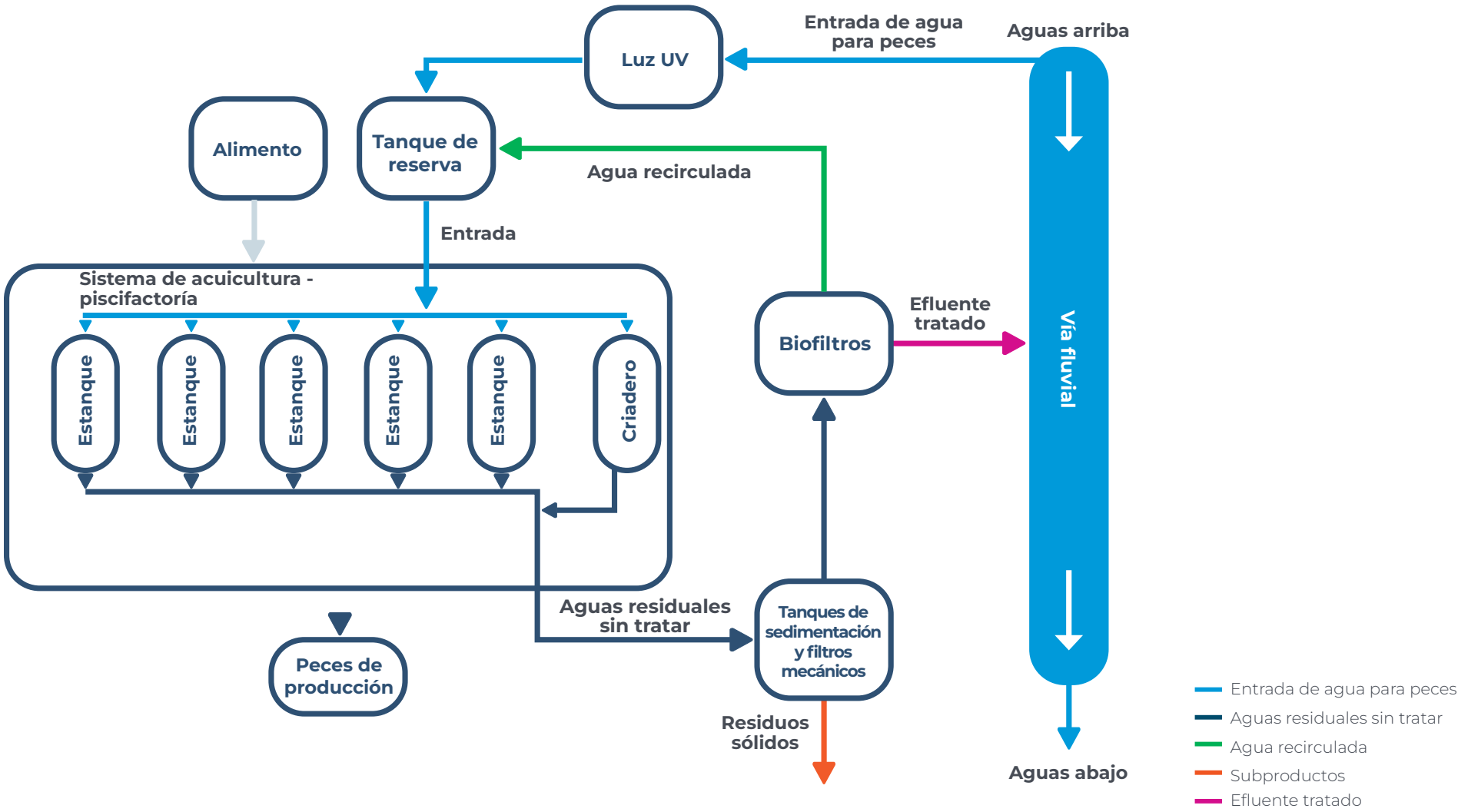
acuicultura se practica en diversos cuerpos de agua, incluidos sistemas cerrados como estanques y tanques, sistemas semicerrados como canales y lagos, y sistemas abiertos como ríos y mares⁵. Tradicionalmente, la acuicultura continental de agua dulce ha dependido de las fuentes de agua de los sistemas acuáticos cercanos, como arroyos, lagos y aguas subterráneas⁶.

En la acuicultura, el agua se utiliza directamente en los sistemas de cultivo, que pueden ser de flujo continuo o recirculado, o funcionar como estanques⁷. El agua también se utiliza en las instalaciones de apoyo y para el reabastecimiento periódico debido a la evaporación o percolación⁸.

En la acuicultura en alta mar, el uso de agua de mar para la cría de peces puede clasificarse en dos enfoques principales: el diseño de jaulas abiertos y los sistemas de jaulas cerrados. Los sistemas de jaulas abiertas consisten en cerramientos de malla colocados directamente en el medio marino, lo que permite que el agua fluya libremente a través de las jaulas. Por otro lado, los sistemas de jaulas cerrados proporcionan un entorno más controlado al encerrar a los peces dentro de estructuras que impiden el contacto directo con el agua circundante. Estos sistemas utilizan tecnologías avanzadas de filtración y recirculación para tratar y reciclar el agua, minimizando el vertido de contaminantes y reduciendo el riesgo de transmisión de enfermedades a los peces salvajes⁹.

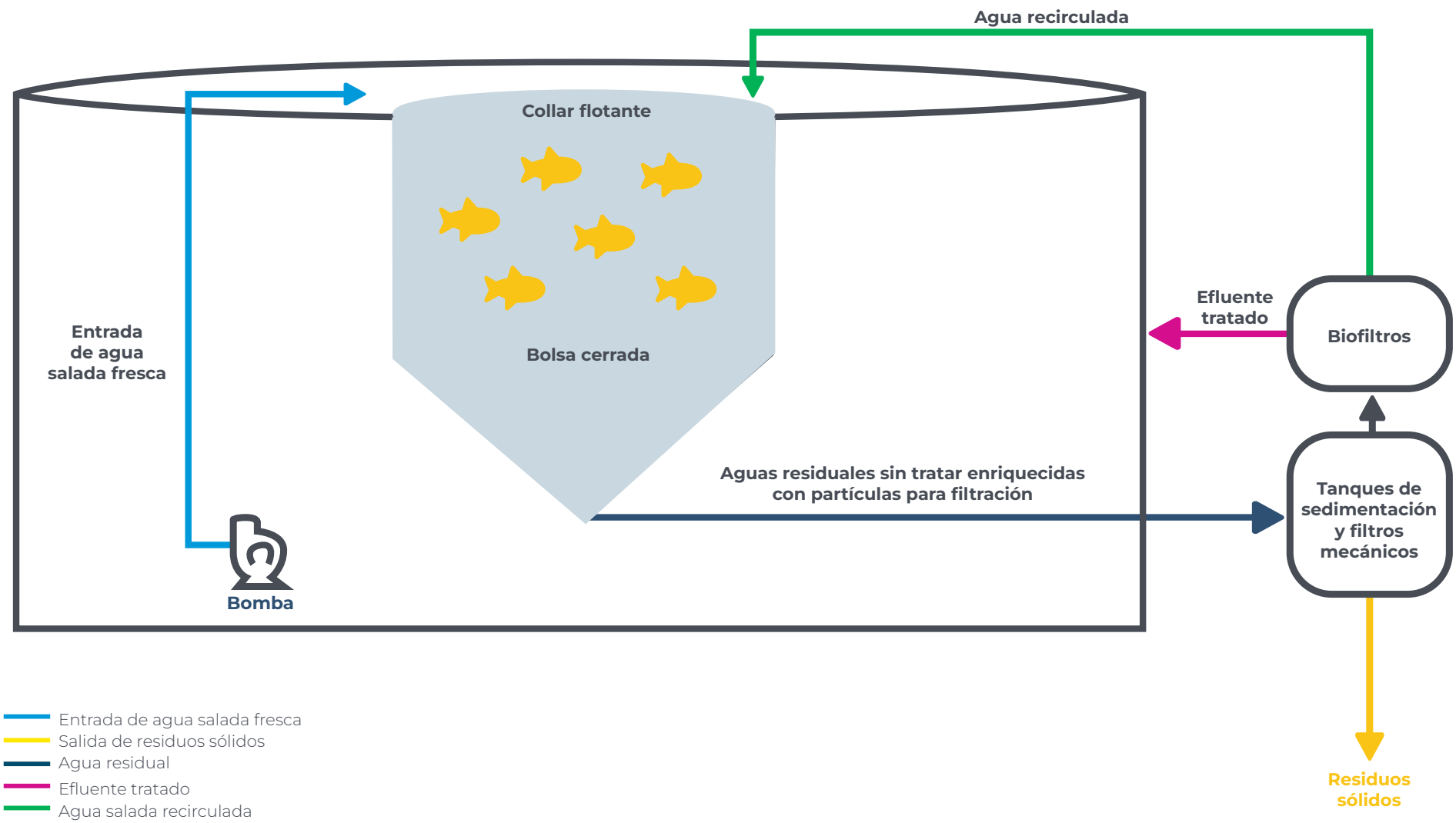
La Figura 1 y la Figura 2 presentan un cuadro resumen del consumo de agua en la acuicultura de agua dulce y en la acuicultura marina de confinamiento cerrado, respectivamente. Si el agua se recircula, se calcula que debe reponerse un 10% del volumen total de agua al día en función del suministro y de las tasas de alimentación⁷.

FIGURA 1 Diagrama de flujo de la transformación acuícola y el uso del agua en la acuicultura de agua dulce



Fluente: Elaboración propia

FIGURA 2 Diagrama de flujo de la transformación acuícola y el uso del agua en la acuicultura de confinamiento cerrado



2.3 REVISIÓN GENERAL DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

2.3.1 CONTAMINANTES PRINCIPALES Y SUS FUENTES

La acuicultura genera grandes cantidades de aguas residuales que contienen compuestos como MO, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y niveles de N y P. La principal fuente de aguas residuales procede de restos de comida, heces de los peces y cuerpos muertos de los organismos. Otras actividades, como el mantenimiento de estanques o tanques, la aireación y la recolección, pueden provocar la resuspensión de sedimentos, resultando en el aumento de la turbidez y la posible contaminación del agua.

2.3.2 PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES

La acumulación de excrementos y residuos alimentarios durante el cultivo de peces suele provocar deterioro de la calidad del agua, afectando negativamente el ambiente de los organismos receptores. Cuando entran grandes cantidades de residuos orgánicos en los cuerpos de agua, aumenta la actividad metabólica de las bacterias aerobias, lo que significa que se consume oxígeno y se produce su escasez⁷, afectando a la micro y macrofauna aerobias más

vulnerables de los cuerpos de agua receptoras. El enriquecimiento orgánico en los sedimentos del cuerpo de agua debido a una población microbiana insuficiente puede conducir a un proceso de eutrofización. Los residuos químicos también pueden llegar a los medios acuáticos como sustancias contaminantes emergentes, incluidos los restos de antibióticos y hormonas que se hayan podido aplicar a las especies cultivadas¹⁰.

Adicionalmente, el uso intensivo de agua en la acuicultura presenta retos significativos. Aunque la acuicultura de agua dulce tiene el potencial de utilizar agua de diferentes etapas del ciclo hidrológico, depende principalmente de fuentes de agua dulce superficial. La disponibilidad limitada de agua dulce superficial genera preocupación en cuanto al uso sostenible del agua en las prácticas acuícolas. En particular, las aguas subterráneas suelen tener características químicas más estables que las superficiales. Sin embargo, pueden contener niveles indeseables de sales disueltas, iones metálicos y altas concentraciones de gases tóxicos. En muchas regiones, existe una preocupación creciente por la contaminación de las aguas subterráneas debido a contaminantes persistentes que pueden perjudicar a la acuicultura. Aunque los recursos de aguas subterráneas son más abundantes que los de aguas superficiales en todo el mundo, las explotaciones acuícolas suelen extraer el agua directamente de los ríos o de fuentes alternativas. Algunas explotaciones acuícolas también han explorado la posibilidad de reutilizar el agua previamente empleada en el riego¹¹. Tanto si se obtiene el agua directamente de los ríos, como si se reutiliza el agua de riego, es esencial aplicar prácticas sostenibles de gestión del agua en las explotaciones acuícolas, haciendo hincapié en el uso eficiente del agua (ver Sección 3.1).

Las operaciones de acuicultura también pueden actuar como criaderos de diferentes insectos, especialmente mosquitos y moscas, aumentando así el riesgo de enfermedades transmitidas por insectos entre las comunidades de la región¹².

2.4 DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL

La Tabla 1 ofrece información sobre los parámetros medios de calidad de las aguas residuales de la acuicultura, generadas a partir de diferentes especies cultivadas y mediante varios sistemas de cultivo. Las cantidades y características de las aguas residuales pueden variar en función de las especies concretas cultivadas, los métodos empleados en su cultivo y la dilución. Estos datos ayudan a comprender las variaciones en la composición de las aguas residuales y orientan los esfuerzos para desarrollar estrategias eficaces de gestión de las aguas residuales en las operaciones acuícolas.

TABLA 1 Valores medios de los parámetros de calidad de las aguas residuales crudas de acuicultura procedentes de diversas fuentes

Parámetros	Estanques para tilapias con recirculación ¹³	Cultivo de almejas ¹⁴	Granjas camaroneras ¹⁵
DQO (mg/L)	253	140.02	564
SST (mg/L)	NR	NR	9510.67
N total como NO ₃ -N (mg/L)	18.1	5.81	3.29
P total como PO ₄ (mg/L)	2.5	4.5	-
pH	6.97	-	8.23

3 Mejores Prácticas de Gestión de Aguas Residuales (MPGAR)



3.1 MPGAR PARA LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Es vital priorizar la utilización de tecnologías como los Sistemas de Recirculación de Acuicultura (SRA) y aplicar estrategias efectivas de gestión de la contaminación para garantizar la sostenibilidad de la acuicultura. Se recomienda utilizar alimentos con niveles más bajos de N y P que sean altamente digestibles. Debe evitarse la sobrealimentación para minimizar los residuos. El empleo de prácticas como las técnicas de drenaje parcial, la retención del agua restante en el estanque después de la cosecha y la abstención de verter agua durante la cosecha con redes, pueden reducir eficazmente los sólidos en suspensión y los niveles de contaminación en el efluente.

Para obtener una visión general de las técnicas de gestión para la prevención de la contaminación de las aguas residuales en la acuicultura, consulte la Sección 4 de la NBP y los ejemplos de la Tabla 2.

TABLA 2 Técnicas de gestión para prevenir la contaminación de las aguas residuales en la acuicultura

Técnicas de gestión para prevenir la contaminación	Descripción de controles
La aplicación de aireación puede mejorar significativamente la calidad del agua al aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto ⁸	- Es esencial controlar regularmente los niveles de OD y la temperatura del agua, con una frecuencia recomendada de al menos dos veces al día. Lo ideal es un control continuo con una sonda que permita evaluar estos parámetros cada hora. - Realizar inspecciones periódicas de los dispositivos de aireación y mantenimiento preventivo: Se considera que un programa de inspección mensual es suficiente para garantizar el correcto funcionamiento y abordar con prontitud cualquier posible problema. Sin embargo, en los casos en que los sistemas de acuicultura se utilizan considerablemente, pueden ser necesarias inspecciones más frecuentes, como quincenales o incluso semanales, para mantener un rendimiento óptimo.
Instalación de sistemas de recirculación de agua ⁷	- Realizar un control interno semanal de los parámetros de calidad del agua, como pH, conductividad, SDT, temperatura y OD. - Realizar mantenimiento regular del sistema de recirculación de agua: incluye limpieza de filtros, comprobación de fugas y la verificación del correcto funcionamiento de las bombas y otros equipos. Por lo general, se considera que un programa de inspección mensual es suficiente para garantizar un funcionamiento adecuado y abordar con prontitud cualquier posible problema. Sin embargo, en los casos en que los sistemas de acuicultura se utilicen significativamente, puede ser necesario realizar inspecciones más frecuentes, como quincenales o incluso semanales, para mantener un rendimiento óptimo. - Llevar a cabo la desinfección del agua y el equipo, poner en cuarentena a los nuevos animales y realizar controles sanitarios mensuales de los peces u organismos acuáticos.
Mejorar la tasa y la calidad de la alimentación ¹⁶	- Controlar que el alimento tenga el mínimo número de partículas finas o polvos. - Controlar diariamente la ingesta de alimento para determinar si se está consumiendo. - Sustituir los alimentos por otros con menor concentración de N y P y mayor digestibilidad.
Reducción de sólidos en el efluente ¹²	- Utilizar estanques de decantación y trampas de sedimentos antes del vertido. - Evitar el vertido de agua de los estanques durante la recolección con redes. - Asegurar no alimentar a los peces dos días antes de la cosecha del estanque para reducir las concentraciones de nutrientes en el efluente. - Realizar el mantenimiento mensual de los sistemas de vertido y de los equipos de control de la erosión instalados en el punto de vertido.
Aplicación de técnicas de drenaje ¹²	- Mantener niveles adecuados en los estanques y prever almacenamiento para precipitaciones. - Utilizar técnicas de drenaje parcial para vaciar el 85% de los estanques cuando se coseche.

3.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales de la acuicultura suele incluir varias etapas para garantizar la eliminación efectiva de los contaminantes y mantener la calidad del agua. Las etapas de tratamiento recomendadas pueden variar en función de las necesidades y características específicas de las aguas residuales, pero generalmente incluyen procesos físicos, químicos y biológicos. En la Tabla 3 se revisan de forma exhaustiva los métodos habituales de tratamiento de las aguas residuales de la acuicultura, teniendo en cuenta las tecnologías tradicionales y las más novedosas.

TRATAMIENTO PRIMARIO

La primera etapa del tratamiento consiste en eliminar los sólidos en suspensión y las partículas de mayor tamaño de las aguas residuales, lo cual se realiza mediante procesos físicos como la sedimentación, la decantación y la filtración. Los tanques de sedimentación o las cuencas de decantación permiten que los sólidos más pesados se depositen en el fondo, mientras que los métodos de filtración, como filtros de arena o de malla, permiten atrapar y eliminar los sólidos en suspensión.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Después de eliminar los sólidos, las aguas residuales se someten a un tratamiento biológico para descomponer la materia orgánica y eliminar los nutrientes. Esta etapa suele implicar el uso de bacterias y otros microorganismos que permiten la descomposición y oxidación de los compuestos orgánicos. Entre los métodos habituales de tratamiento biológico se encuentran los biofiltros sumergidos, los filtros percoladores, los reactores biológicos rotativos, los reactores de lecho fluidizado y los sistemas de lodos activos. Estos procesos proporcionan un entorno para el crecimiento de microorganismos beneficiosos que metabolizan los contaminantes orgánicos, convirtiéndolos en sustancias menos nocivas.

TRATAMIENTO QUÍMICO (DE SER NECESARIO)

El tratamiento químico puede emplearse en función de las características específicas de las aguas residuales y de los niveles deseados de la calidad del agua. Los coagulantes, floculantes o desinfectantes químicos pueden eliminar los sólidos en suspensión y clarificar o desinfectar el agua para eliminar patógenos. Sin embargo, el uso de productos químicos debe gestionarse cuidadosamente para minimizar cualquier posible impacto negativo sobre el ambiente.

TRATAMIENTO DE HUMEDALES (OPCIONAL)

En algunos casos, pueden integrarse en el sistema de tratamiento humedales artificiales o franjas filtrantes de vegetación natural. Estos humedales utilizan plantas acuáticas y los procesos naturales de filtración, sedimentación y absorción de nutrientes para potenciar aún más la calidad del agua. Proporcionan un tratamiento y pulido adicionales de las aguas residuales antes de su vertido o reutilización⁸.

Además del tratamiento, priorizar la recirculación de las aguas residuales es crucial en la acuicultura, especialmente en los SRA. Esta técnica avanzada no solo trata las aguas residuales eliminando los contaminantes nocivos, sino que también recicla el agua tratada, utilizando eficientemente los recursos hídricos. Una ventaja clave de los SRA es su capacidad para producir cantidades significativas de peces utilizando un volumen de agua relativamente pequeño⁷.

En los SRA, las aguas residuales generadas por las peceras pasan por varios procesos de tratamiento, como la eliminación de sólidos, la filtración biológica y la desinfección. Estos procesos son esenciales para mantener la calidad del agua y eliminar sustancias tóxicas. Un aspecto crítico relevante en los SRA es la presencia de amoníaco que las especies de peces liberan principalmente como producto de desecho en la acuicultura. El amoníaco es muy tóxico para los peces y, en concentraciones elevadas, puede causarles estrés grave, daño en los tejidos, trastornos del crecimiento e incluso la muerte.

Puede ser necesario un proceso de nitrificación, para abordar la toxicidad del amoníaco y convertirlo en nitrato. La nitrificación se consigue a menudo en la acuicultura utilizando bacterias nitrificantes presentes en biofiltros especializados o medios de biopelícula¹⁷.

TABLA 3 Tecnologías de tratamiento comunes para las aguas residuales de la acuicultura.

Industria	Tratamiento preliminar	Tratamiento	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Tratamiento de lodos	Tecnologías emergentes
Acuicultura	Tamices, filtros mecánicos.	Tanque de sedimentación, clarificador, centrifugadora.	Biofiltros sumergidos, filtros percoladores, reactores biológicos rotativos y reactores de lecho fluidizado.	Humedales artificiales.	Los lodos producidos en el tratamiento primario y secundario deben deshidratarse antes de su eliminación mediante lechos de secado de lodos, centrifugadoras o decantadores. Se recomienda secar aún más los lodos para producir biosólidos que puedan reutilizarse.	Reactor de biopelícula aireado por membrana en un SRA para el tratamiento de efluentes ¹⁸ . Sistema SRA-polihidroxibutirato (PHB) ¹⁹ . Sistema de biofiltración de zeolita en dos etapas para la acuicultura de agua salobre ²⁰ . Métodos híbridos de electrocoagulación-filtración en el pretratamiento de aguas residuales de acuicultura marina ²¹ .

3.3 MPGAR: EJEMPLO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

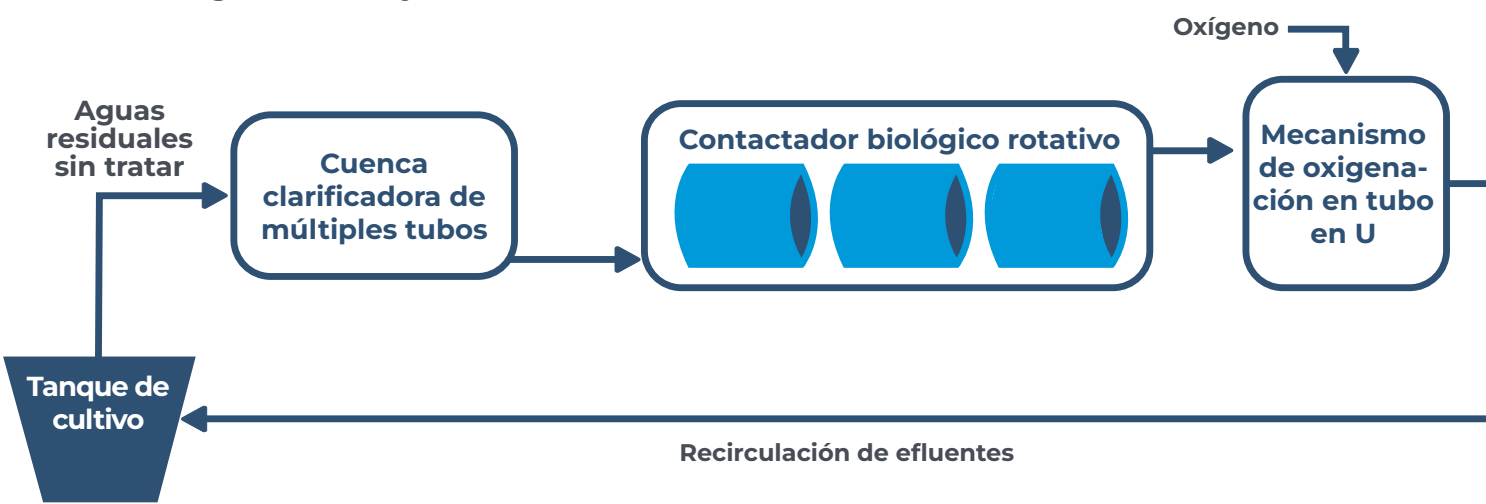
Un ejemplo de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) existente se encuentra dentro de una instalación de cría de tilapia con una producción anual aproximada de 1.380 toneladas métricas. Esta instalación emplea sistemas de recirculación de acuicultura. Los objetivos principales de este sistema incluyen la detoxificación de residuos nitrogenados, la oxigenación, la eliminación de sólidos en suspensión y la regulación de compuestos orgánicos acumulados.

El tratamiento consiste en un reactor biológico rotativo (RBC, por sus siglas en inglés) de tamaño industrial. Después de salir del tanque de cultivo de 215 m³ de capacidad, el agua se somete a una secuencia de flujo, pasando por un tanque clarificador multitubular de 37 m³. Posteriormente,

el agua se dirige a través de la configuración del RBC a escala industrial. La estructura RBC está organizada en tres etapas y posicionada con su eje central alineado en paralelo con el flujo de tratamiento. Funciona con una tasa de carga hidráulica de aproximadamente 407 m³/m² de superficie al día. Seguidamente, el agua tratada se

impulsa (a una velocidad de 3,8 m³/min) a través de un mecanismo de oxigenación de tubo en U, antes de reintroducirse en el tanque de cultivo. El sistema alcanzó una eficiencia media de eliminación de 0,42 g de ton/m² de superficie al día y una eficiencia global de eliminación del 90% de DQO.

FIGURA 3 Diagrama de flujo de un SRA



3.4 MPGAR: ejemplo

Cada país dispone de normas específicas para la gestión y reutilización de las aguas residuales, con reglamentos que establecen umbrales de calidad del agua admisibles para distintas situaciones, como el vertido en cuerpos de agua, zonas costeras y sistemas de alcantarillado sanitario, así como la reutilización de las aguas residuales depuradas. La NBP en la Sección 2.2. incluye una comparación de los parámetros de calidad establecidos en distintos países. La Tabla A-1 del Anexo I del NBP ofrece una visión global del marco legislativo para la gestión de las aguas residuales en la región de LAC.

Las Directrices sobre Ambiente, Salud y Seguridad para la Acuicultura del Grupo del Banco Mundial (GBM) establecen los límites máximos admisibles de vertido en cuerpos de agua para los parámetros enumerados a continuación en la Tabla 4. Estos límites deben ser alcanzables en condiciones normales de funcionamiento en instalaciones diseñadas y operadas adecuadamente, y pueden utilizarse como indicadores clave de desempeño del tratamiento de aguas residuales. Los nuevos proyectos deben cumplir las Directrices sobre Ambiente, Salud y Seguridad de la NBP, o la normativa nacional (Anexo I de la NBP), la que sea más estricta.

TABLA 4 Límites admisibles de los vertidos en los cuerpos de agua¹²

Contaminante	Valor guía
pH	6-9
DBO ₅	50 mg/L
DQO	250 mg/L
N _{Total}	10 mg/L
P _{Total}	2 mg/L
Grasas y aceites	10 mg/L
SST	50 mg/L
Aumento de temperatura	< 3 °C
Bacterias coliformes totales	400 MPN/100 mL

Para prevenir los impactos ambientales y sociales, es crucial controlar periódicamente la calidad de los efluentes y proporcionar mecanismos de retroalimentación adecuados. En la Sección 6.5 de la NBP se proporciona más información sobre la correcta gestión de las aguas residuales en el sector agroindustrial. Para alcanzar los objetivos de un programa de control de las aguas residuales y de la calidad del agua, es esencial desarrollar y aplicar un programa que cuente con los recursos y la supervisión de gestión necesarios. La Tabla 9 de la NBP describe los puntos de muestreo y los requisitos analíticos para las muestras de aguas de proceso y aguas residuales, y recomienda una frecuencia de muestreo. Las normativas locales y otros requisitos de control de la calidad de las aguas residuales y del agua deben ser siempre la máxima prioridad y prevalecer sobre cualquier directriz o recomendación general. Aunque la frecuencia de muestreo sugerida puede ser un buen punto de partida, es esencial comprender y cumplir la normativa local y los requisitos establecidos por los organismos reguladores.

En el caso de la acuicultura, el control de parámetros como el pH, la concentración de OD, la turbidez, la temperatura y el caudal de agua del efluente tratado debe realizarse con una frecuencia que pueda proporcionar datos representativos (para más información, consulte la Sección 6.5. de la NBP). La información registrada debe incluir la fecha, la hora, los resultados de las mediciones, los ajustes realizados y otros datos relevantes. Es necesario utilizar equipos calibrados y asegurar que operarios capacitados realizan las mediciones. También se requiere un espacio de laboratorio en la planta de tratamiento para esta tarea. Deben establecerse procedimientos de registro para documentar los resultados del control. Los laboratorios externos certificados (preferiblemente ISO 17025) deberán proporcionar registros de seguimiento para los análisis microbianos y fisicoquímicos, y la frecuencia dependerá de los marcos normativos de cada región. La recomendación es hacerlo, al menos, trimestralmente.

4

Referencias

(1) Futuris Consulting. Good Practice Note: Wastewater Management for the Agribusiness Sector, 2023.

(2) Towards Blue Transformation; FAO, Ed.; The state of world fisheries and aquaculture; FAO: Rome, 2022. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>.

(3) Ansari, F. A.; Singh, P.; Guldhe, A.; Bux, F. Microalgal Cultivation Using Aquaculture Wastewater: Integrated Biomass Generation and Nutrient Remediation. *Algal Res.* 2017, 21, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.015>.

(4) Crab, R.; Avnimelech, Y.; Defoirdt, T.; Bossier, P.; Verstraete, W. Nitrogen Removal Techniques in Aquaculture for a Sustainable Production. *Aquaculture* 2007, 270 (1–4), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006>.

(5) Ahmed, N.; Ward, J. D.; Thompson, S.; Saint, C. P.; Diana, J. S. Blue-Green Water Nexus in Aquaculture for Resilience to Climate Change. *Rev. Fish. Sci. Aquac.* 2018, 26 (2), 139–154. <https://doi.org/10.1080/23308249.2017.1373743>.

(6) Zaibel, I.; Arnon, S.; Zilberg, D. Treated Municipal Wastewater as a Water Source for Sustainable Aquaculture: A Review. *Rev. Aquac.* 2022, 14 (1), 362–377. <https://doi.org/10.1111/raq.12602>.

(7) Tom, A. P.; Jayakumar, J. S.; Biju, M.; Somarajan, J.; Ibrahim, M. A. Aquaculture Wastewater Treatment Technologies and Their Sustainability: A Review. *Energy Nexus* 2021, 4, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022>.

(8) Maryland Aquaculture Coordinating Council. Best Management Practices: A Manual for Maryland Aquaculture, 2007.

(9) Fujita, R.; Brittingham, P.; Cao, L.; Froehlich, H.; Thompson, M.; Voorhees, T. Toward an Environmentally Responsible Offshore Aquaculture Industry in the United States: Ecological Risks, Remedies, and Knowledge Gaps. *Mar. Policy* 2023, 147, 105351. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105351>.

(10) Senarathna, D. D.; Abeysooriya, K. N.; Vithushana, T.; Dissanayake, D. Veterinary Pharmaceuticals in Aquaculture Wastewater as Emerging Contaminant Substances in Aquatic Environment and Potential Treatment Methods. *MOJ Ecol. Environ. Sci.* 2021, 6 (3), 98–102. <https://doi.org/10.15406/mojes.2021.06.00221>.

(11) FAO. Three Overviews on Environment and Aquaculture in the Tropics and Sub-Tropics; 1994. <https://www.fao.org/3/AD002E/AD002E00.htm>.

(12) World Bank Group. Environmental, Health, and Safety Guidelines for Aquaculture, 2007.

(13) Halfhide, T.; Åkerstrøm, A.; Lekang, O. I.; Gislerød, H. R.; Ergas, S. J. Production of Algal Biomass, Chlorophyll, Starch and Lipids Using Aquaculture Wastewater under Axenic and Non-Axenic Conditions. *Algal Res.* 2014, 6, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.10.009>.

(14) Lukwambe, B.; Yang, W.; Zheng, Y.; Nicholaus, R.; Zhu, J.; Zheng, Z. Bioturbation by the Razor Clam (*Sinonovacula Constricta*) on the Microbial Community and Enzymatic Activities in the Sediment of an Ecological Aquaculture Wastewater Treatment System. *Sci. Total Environ.* 2018, 643, 1098–1107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.251>.

(15) De Menezes, F. L. G.; Da Silva, A. J. C.; Martínez-Huitle, C. A.; Zanta, C. L. P. S.; Alves, J. J. F.; Castro, S. S. L. Electrochemical Treatment of Shrimp Farming Effluent: Role of Electrocatalytic Material. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017, 24 (7), 6061–6070. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7408-4>.

(16) Turcios, A.; Papenbrock, J. Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents—What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability* 2014, 6 (2), 836–856. <https://doi.org/10.3390/su6020836>.

(17) Preena, P. G.; Rejish Kumar, V. J.; Singh, I. S. B. Nitrification and Denitrification in Recirculating Aquaculture Systems: The Processes and Players. *Rev. Aquac.* 2021, 13 (4), 2053–2075. <https://doi.org/10.1111/raq.12558>.

(18) Almeida, J. C. R.; Bega, J. M. M.; Leite, L. D. S.; De Oliveira, J. N.; Albertin, L. L.; Matsumoto, T. Membrane Aerated Biofilm Reactor in Recirculating Aquaculture System for Effluent Treatment. *Environ. Technol.* 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2078674>.

(19) Asiri, F.; Chu, K.-H. A Novel Recirculating Aquaculture System for Sustainable Aquaculture: Enabling Wastewater Reuse and Conversion of Waste-to-Immune-Stimulating Fish Feed. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2020, 8 (49), 18094–18105. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06375>.

(20) Fei, X.; Sun, S.; He, S.; Huang, J.; Zhou, W. Application of a Novel Two-Stage Biofiltration System for Simulated Brackish Aquaculture Wastewater Treatment. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020, 27 (1), 636–646. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06969-z>.

(21) Xu, J.; Du, Y.; Qiu, T.; Zhou, L.; Li, Y.; Chen, F.; Sun, J. Application of Hybrid Electrocoagulation–Filtration Methods in the Pretreatment of Marine Aquaculture Wastewater. *Water Sci. Technol.* 2021, 83 (6), 1315–1326. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.044>.

