

10. Sistemas de recirculación: Hacia un modelo de economía circular en la acuicultura



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.365.10>

IVÁN GALLEGO-ALARCON¹

SERGIO ALCARAZ-IBARRA²

DAVID GARCÍA-MONDRAGÓN³

GEHOVANA GONZÁLEZ-BLANCO⁴

BORIS MIGUEL LÓPEZ-REBOLLAR⁵

CARLOS ROBERTO FONSECA⁶

LAURA WHITE OLASCOAGA⁷

IVÁN CERVANTES-ZEPEDA⁸

Resumen

La acuicultura se ha desarrollado en un contexto de crecientes presiones ambientales y regulatorias, donde la competencia por el agua ha impactado su productividad. Las exigencias sociales y gubernamentales son cada vez mayores, dificultando la obtención de concesiones de uso de agua y endureciendo los trámites en comparación con décadas pasadas. Ante estos desafíos, la economía circular surge como una solución integral mediante la

¹ Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex), México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-6532>

² Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2270-5741>

³ Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1721-5465>

⁴ Doctora en Biotecnología. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3818-3458>

⁵ Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6914-0787>

⁶ Doctor en Ciencias del Agua. Profesor-investigador de la UAEMex, México, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3377-6564>

⁷ Doctora en Ciencias Ambientales. Profesora-investigadora de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9189-3902>

⁸ Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesor-investigador de la UAEMex, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2859-1223>

implementación de sistemas cerrados. Estos permiten la producción de alimentos de alta calidad bajo un esquema sustentable, reduciendo hasta en un 99% el consumo de agua en comparación con los sistemas abiertos. Además, favorecen el aprovechamiento de fuentes alternativas como el agua de lluvia o la proveniente de humedales artificiales. Un problema clave de la acuicultura tradicional es la eutrofización de cuerpos de agua debido a la descarga de residuos sólidos y líquidos. Sin embargo, los sistemas cerrados incorporan estrategias para reutilizar estos desechos como fertilizantes en cultivos agrícolas o nutrientes para otros organismos acuáticos, como en los sistemas acuapónicos. Asimismo, están diseñados con materiales y procesos que garantizan un ciclo operativo continuo. En este sentido, estos sistemas representan un cambio de paradigma en la gestión de los recursos hídricos, promoviendo un modelo basado en la economía circular que garantiza la producción sostenible de alimentos sin comprometer el equilibrio ambiental.

Palabras clave: *sistemas de recirculación acuícola, revalorización de residuos, gestión de recursos, sostenibilidad.*

Introducción

Acuicultura

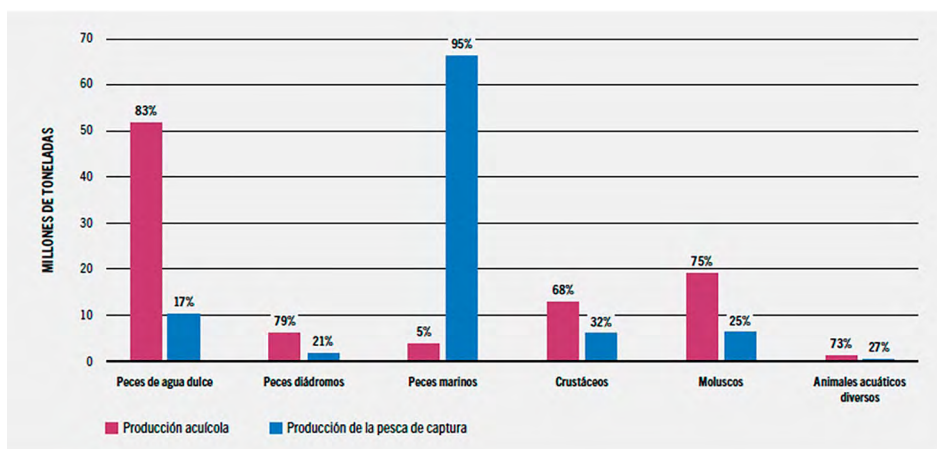
La acuicultura se define como la producción controlada, en condiciones de confinamiento de organismos acuáticos que desarrollan todo o parte de su ciclo de vida en ambientes acuáticos, con el objetivo de obtener biomasa (principalmente carne) o ejemplares para diversos fines de interés humano, como el consumo alimentario, la conservación, la repoblación o el uso ornamental con un enfoque sustentable.

Esta actividad se clasifica en dos grandes ramas: la maricultura, que se refiere al cultivo de especies en ambientes marinos o salobres, y continental o de agua dulce. La acuicultura se practica predominantemente con peces de agua dulce a nivel global. Entre las especies de mayor importancia económica y productiva destacan las carpas (*Cyprinidae*), los salmónidos

(*Salmonidae*) y las tilapias (*Oreochromis* spp.). En el caso de organismos marinos la producción de camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*) representa una de las especies más cultivadas a nivel mundial.

El impacto de la acuicultura es evidente al compararla con la pesca: actualmente, solo los organismos marinos continúan siendo extraídos en mayor volumen mediante pesca. La mayoría de los organismos acuáticos de agua dulce y otras especies acuícolas ya se producen en sistemas controlados (figura 10.1).

Figura 10.1. Producción pesquera y acuícola por grupos de especies



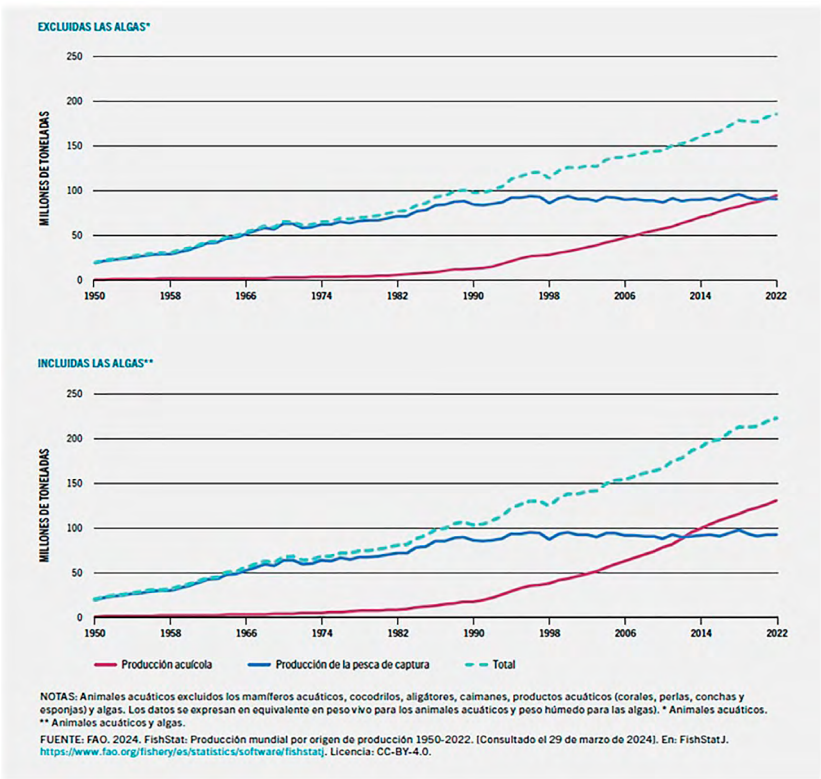
Fuente: FAO (2024).

La acuicultura ha evolucionado como industria durante las últimas cinco décadas, tanto a nivel global como nacional. Entre los años 2000 y 2022, esta actividad presentó una tasa de crecimiento promedio anual del 5.2%. Posterior a la pandemia de covid-19, la acuicultura mundial experimentó un repunte, alcanzando un crecimiento del 7.6%.

La participación de la acuicultura en la producción total de organismos acuáticos ha mostrado un incremento sostenido desde 1990. En el año 2022, se registró una producción acuícola mundial de 94 millones de toneladas (figura 10.2), lo que representó el 51% del total, superando por primera vez a la producción proveniente de la pesca extractiva, que fue de 91 millones de toneladas (49%) (FAO, 2024).

Se estima que aproximadamente 22 millones de personas dependen directamente de la acuicultura como fuente de empleo e ingresos a nivel global. En América Latina, se calcula que alrededor de 800 mil personas están vinculadas laboralmente a esta actividad. En términos de distribución geográfica del empleo acuícola, el continente asiático concentra el 85% del total, seguida por África (10%), América Latina y el Caribe (4%), y un 1% conjunto en América del Norte, Europa y Oceanía (FAO, 2024).

Figura 10.2. Producción pesquera y acuícola mundial



Fuente: FAO (2024).

En 2022, México produjo más de 304 mil toneladas de productos derivados de la acuicultura en 2022, lo que representó aproximadamente el 14% de la producción total de organismos acuáticos en el país. El valor

económico de esta producción superó los 20.5 mil millones de pesos. La especie de mayor producción en el país fue el camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), con 192.6 mil toneladas y un valor de 16.1 mil millones de pesos. En la figura 10.3, se muestran otras especies relevantes para el sector acuícola mexicano, tales como la tilapia (*Oreochromis* spp.), el ostión (*Crassostrea* spp.), la carpa (*Cyprinus carpio*) y el atún (*Thunnus* spp.) (Conapesca, 2023).

Figura 10.3. Producción acuícola y su valor en México para el año 2022

ESPECIES	VOLUMEN 1/	VALOR
TOTAL	300,207	20,520,333
CAMARÓN	192,638	16,130,130
MOJARRA	58,482	2,229,583
OSTIÓN	29,951	804,560
CARPA	8,083	400,477
ATÚN	5,166	516,592
LOBINA	1,432	110,869
BAGRE	990	60,525
CHARAL	963	38,134
TRUCHA	865	99,009
ORNATO	8	618
LANGOSTINO	5	1,498
OTRAS	1,624	128,338

1/ PESO DESEMBARCADO.

FUENTE: COMISIÓN NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL DE PLANEACIÓN, PROGRAMACIÓN Y EVALUACIÓN. LA SUMA DE LOS PARCIALES PUEDE NO COINCIDIR CON EL TOTAL POR EL REDONDEO DE LAS CIFRAS.

Fuente: Conapesca (2023).

Esta actividad se ha desarrollado en un contexto caracterizado por crecientes presiones ambientales y regulatorias a pesar de los beneficios sociales y económicos que ofrece la acuicultura. En particular, la competencia por el recurso hídrico ha afectado negativamente su productividad. En este escenario, las unidades de producción acuícola (UPA) han encontrado en los sistemas cerrados, y en particular en los sistemas de recirculación acuícola (SRA), una solución integral dentro del marco de la economía circular.

Unidades de producción acuícola (UPA)

La unidad de producción acuícola es la unidad básica de la actividad acuícola, y se refiere al conjunto de estructuras diseñadas para contener agua

y permitir la producción controlada de organismos acuáticos. Estas estructuras pueden incluir estanques, tanques, jaulas, tinas, entre otras, y su propósito principal es mantener a los organismos en condiciones de cautiverio. La elección de la forma, tamaño y material de construcción de estas estructuras depende de diversos factores económicos, técnicos y operacionales.

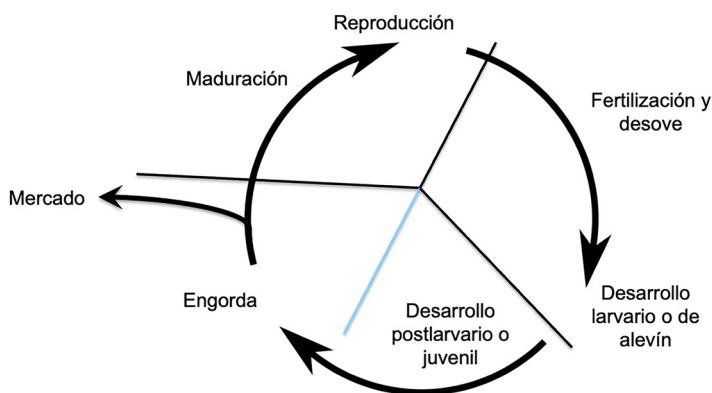
Uno de los factores más relevantes para determinar el tipo de estanques en una UPA es la densidad de producción al final del ciclo, que se refiere a la cantidad de biomasa por unidad de volumen o área. De acuerdo con esta densidad, las UPAS pueden clasificarse en diferentes tipos: extensivas, semiintensivas, intensivas e hiperintensivas. Las UPAS extensivas suelen tener una densidad de producción muy baja y emplean estanques generalmente de tierra, de forma rectangular, con tecnología mínima o nula, baja o nula alimentación externa. En contraste, las UPAS hiperintensivas operan con altas densidades de biomasa, utilizando estanques circulares, generalmente contruidos con materiales plásticos como geomembranas, y cuentan con un alto nivel de tecnología.

Otros factores clave que influyen en la configuración de estas unidades incluyen el tipo de agua utilizada (dulce o salada), los organismos acuáticos que se cultivan (como ostiones, camarones, peces, anfibios, reptiles acuáticos, entre otros), el ciclo de vida de los organismos (ciclo completo, crías, engorda), y el flujo de agua en el sistema, que puede ser abierto, semicerrado o cerrado.

El ciclo de vida de los organismos acuáticos (figura 10.4) determina las diferentes zonas dentro de una unidad de producción acuícola (UPA). En general, estas unidades se dividen en cinco áreas funcionales: reproducción, larvario y cría de alevín, preengorda, engorda, y sacrificio o rastro.

A. Reproducción. En esta área se encuentran los animales adultos, los cuales se mantienen para gestionar la reproducción, ya sea de manera natural o artificial, con el fin de obtener la materia prima para la producción, como larvas o alevines de la especie cultivada. La infraestructura en esta fase varía según la especie, pudiendo ir desde estanques rústicos hasta instalaciones especializadas contruidas en concreto o fibra de vidrio.

Figura 10.4. Ciclo de vida en cautiverio de organismos acuícolas



Fuente: elaboración propia.

- B. *Larvario y cría de alevín*. En esta zona se gestionan los organismos en su etapa inicial, desde los huevos hasta que los alevines eclosionan y alcanzan un crecimiento fisiológico que les permite aceptar alimento de manera externa. En esta fase es común el uso de alimentos balanceados específicos para cada especie, promoviendo el desarrollo adecuado de los organismos.
- C. *Preengorda*. En esta área se mantienen los organismos en densidades altas dentro de estanques que varían desde rústicos hasta canales de corriente rápida y estanques de concreto. Las dimensiones de estos estanques son menores en comparación con los destinados a la engorda. La función de esta fase es regular el peso y crecimiento de los animales, facilitar la detección temprana de enfermedades y, en ciertos cultivos (como en ranas, truchas o carpas), permitir la separación por tallas.
- D. *Engorda*. La infraestructura en esta fase es similar a la de la preengorda, pero con instalaciones de mayor tamaño, que pueden variar entre 0.001 ha hasta 100 ha. Los animales permanecen en esta etapa hasta alcanzar una talla comercial, listos para ser enviados al mercado.
- E. *Sacrificio o rastro*. Algunas UPAs cuentan con instalaciones para el sacrificio de los animales, con el fin de garantizar que los productos lleguen al mercado sin riesgos de contaminación. Estas instalacio-

nes deben cumplir con las normas de higiene y las regulaciones sobre el bienestar animal, para asegurar la seguridad alimentaria y el cumplimiento de los estándares sanitarios.

Flujo de agua en las UPA

El tipo de flujo de agua en una UPA es determinante para la clasificación del sistema utilizado. Tradicionalmente, se emplea un flujo abierto, donde el agua entra a la unidad, circula por los estanques y luego se descarga en un cuerpo de agua cercano. Este sistema es común en la mayoría de las UPAS, que a menudo utilizan bombas de agua subterránea, o dependen de la gravedad para permitir que el agua fluya desde áreas elevadas.

Por otro lado, las UPAS que operan con flujo cerrado emplean solo la cantidad de agua necesaria para llenar los estanques y los sistemas de filtración. El agua no se descarga, lo que implica una descarga casi nula al medio ambiente. Los sistemas de flujo cerrado ofrecen varias ventajas, como bajos volúmenes de agua, uso eficiente del espacio, reducción de predadores, disminución del riesgo de enfermedades, el control de parámetros críticos como oxígeno disuelto, nitrógeno amoniacal total (NAT) y sólidos suspendidos totales (SST). Sin embargo, presentan desventajas, tales como dependencia total de energía eléctrica, altos costos operativos, la necesidad de mano de obra calificada y el alto costo tecnológico.

Tipos comunes de sistemas de flujo cerrado

Los sistemas más comunes de flujo cerrado utilizados en las UPAS son (1) Biofloc, (2) acuaponía y (3) sistemas de recirculación acuícola (SRA). El sistema Biofloc se basa en comunidades microbianas formadas por flóculos que, bajo condiciones de recirculación constante de agua, alta oxigenación y suplementación con fuentes de carbono, permiten un control eficiente de la calidad del agua a través de procesos naturales (Hernández-Mancipe et al., 2019). La acuaponía integra la acuicultura y la hidroponía, donde los

nutrientes derivados de los desechos de los peces se utilizan para fomentar el crecimiento de plantas que fijan nitratos (Flores-Aguilar et al., 2020). Por último, los Sistemas de Recirculación Acuícola (SRA) consisten en sistemas donde el agua de los estanques pasa por un proceso de tratamiento antes de ser recirculada a los mismos estanques.

Sistemas de recirculación acuícola (SRA)

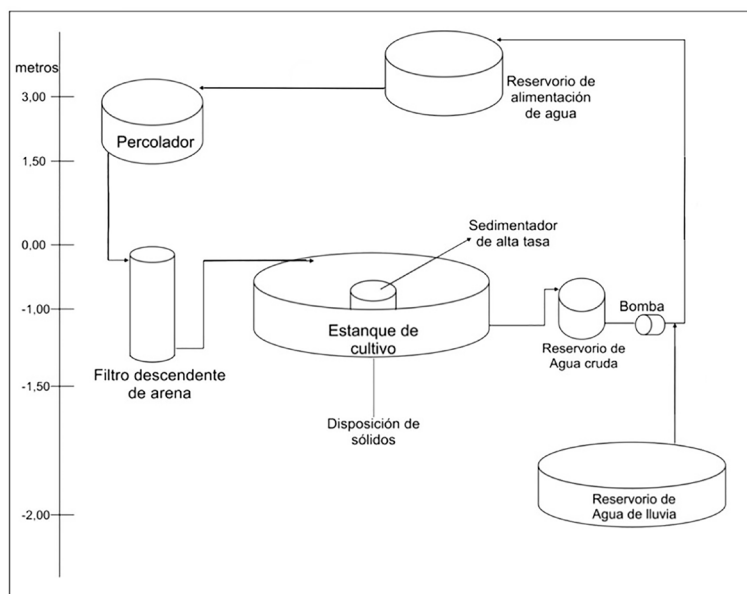
Los sistemas cerrados de recirculación acuícola han sido propuestos como una solución viable frente a las crecientes presiones ambientales, así como a las demandas sociales y regulatorias. Esta tecnología permite una reducción en el consumo de agua de hasta un 99% en comparación con los sistemas tradicionales de flujo abierto, y requiere menos del 1% del área utilizada en la acuicultura convencional (Timmons et al., 2009).

Los SRA ofrecen un control integral sobre todos los parámetros críticos del entorno de cultivo (figura 10.5), lo que posibilita mantener de forma constante la calidad y la disponibilidad de los productos durante todo el año. Esta capacidad de control otorga al operador la posibilidad de gestionar de manera precisa las condiciones ambientales del sistema productivo. No obstante, esta ventaja también implica que el operador asume la responsabilidad total sobre todos los factores que afectan tanto la producción como el bienestar de los organismos cultivados (Tidwell, 2012).

El agua no se desperdicia en los SRA, sino que se reutiliza una y otra vez. Para mantenerla en condiciones óptimas continuamente se oxigena mediante aireadores o incluso oxígeno puro, y al mismo tiempo se eliminan los desechos que generan los peces. Cuando se usa solo aire, la cantidad de peces que puede criarse se limita a unos 40 kg/m³. Sin embargo, si se emplea oxígeno puro (oxigenación) esa cifra puede triplicarse, alcanzando hasta 120 kg/m³ (Timmons et al., 2009).

Estos sistemas usan filtros mecánicos o sedimentadores (gravedad) que retiran los residuos sólidos para limpiar el agua. Después, entran en acción bacterias nitrificantes, que transforman compuestos tóxicos como el nitrógeno amoniacal total (NAT) en otros menos dañinos, como los nitratos. Estas bacterias, que también se usan en estanques, aquí se cultivan

Figura 10.5. Esquema de un SRA para la producción de trucha arcoíris



Fuente: Gallego (2010).

en grandes cantidades dentro de dispositivos llamados biofiltros (Timmons et al., 2009).

Los biofiltros están diseñados para ofrecer a las bacterias superficies donde puedan adherirse y crecer. Para ello, se llenan con materiales conocidos como “medios de soporte”, que no solo aumentan la superficie disponible para el crecimiento bacteriano, sino que también permiten que el agua circule con facilidad. Esto es clave, ya que el flujo constante de agua ayuda a alimentar a las bacterias con los nutrientes originados en los estanques de peces y facilita que excreten sustancias mucho menos tóxicas (Timmons et al., 2009).

Los principales insumos empleados para la producción acuícola son el agua, los organismos acuáticos, el alimento balanceado y el oxígeno disuelto en estos sistemas. Como resultado del proceso productivo, se generan diversos residuos, entre los que destacan: lodos compuestos por alimento no consumido y materia fecal, dióxido de carbono (CO_2), compuestos nitrogenados como amonio/amoniaco ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$, también conocidos

como nitrógeno amoniacal total [NAT]), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-), así como agua residual con carga orgánica y nutrientes, y organismos acuáticos muertos.

Dado que estos sistemas permiten un alto grado de control sobre todos los flujos y residuos de entrada y salida, el aprovechamiento y la valorización de los residuos generados resulta altamente viable dentro del enfoque de la economía circular.

Economía circular y sostenibilidad en la acuicultura

La economía circular propone reducir, reutilizar y reciclar recursos con el objetivo de minimizar los residuos y maximizar el valor de los materiales. A diferencia del modelo lineal de “extraer, producir y desechar”, este enfoque promueve un uso más eficiente y sostenible de los recursos, incluido el agua.

Este concepto se relaciona estrechamente con los sistemas de producción, ya que implica la gestión integral de todos los insumos utilizados en los procesos productivos. En el contexto acuícola, la economía circular busca preservar el valor del agua, los alimentos y los organismos cultivados a lo largo del ciclo de producción, revalorizando los residuos.

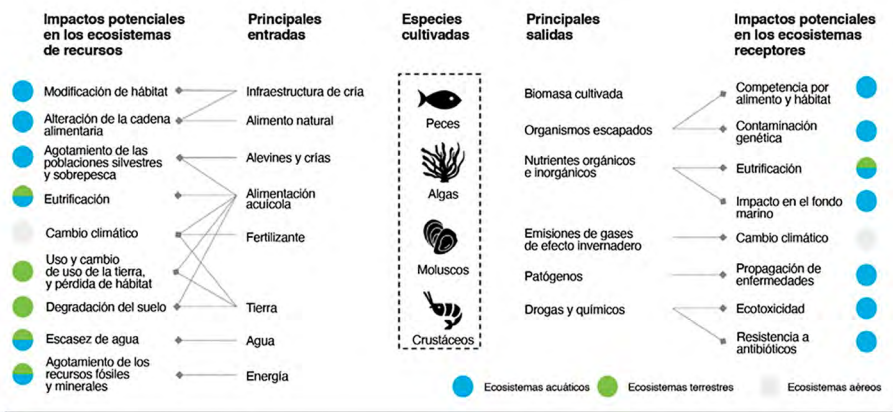
La adopción de principios de economía circular en la acuicultura representa una transición clave: de ser una actividad intensiva y de rápido crecimiento a convertirse en un sector sostenible. Esta transformación contribuye al cumplimiento de los objetivos climáticos globales y a la conservación de los recursos naturales, al tiempo que genera empleo y alimentos de alta calidad mediante prácticas socialmente responsables, económicamente viables y ambientalmente sostenibles (Campanati et al., 2021).

La acuicultura ha sido reconocida como el sector agroalimentario con mayor crecimiento en las últimas décadas (FAO, 2020). En este contexto, se posiciona como una actividad estratégica con un rol fundamental en la seguridad alimentaria, el desarrollo económico y la protección ambiental. Sin embargo, su expansión también implica una mayor presión sobre los recursos esenciales, como el agua y el alimento, lo que exige el desarrollo e

implementación de procesos, tecnologías y prácticas sostenibles (Campanati et al., 2021).

Los sistemas acuícolas impactan tanto a los ecosistemas proveedores de recursos (entradas) como a los receptores de residuos (salidas) (figura 10.6). La magnitud de estos efectos varía según el tipo de sistema alimentado o no, intensivo o extensivo y depende en gran medida de los insumos utilizados. Por ejemplo, el uso de alimentos balanceados de alta calidad en la cría de peces y crustáceos puede reducir las emisiones de nutrientes y alterar el uso del suelo, afectando ecosistemas cercanos y distantes (Chary et al., 2024).

Figura 10.6. Principales entradas y salidas de los sistemas de acuicultura y sus impactos ambientales sobre recursos y ecosistemas receptores



Fuente: modificado de Chary et al. (2024).

Es fundamental identificar y cuantificar los principales residuos y sub-productos generados en los diferentes sistemas de cultivo para avanzar hacia una acuicultura verdaderamente sostenible. Esta información permitirá tomar decisiones informadas sobre su recuperación y valorización, incluyendo el reciclaje de nutrientes mediante biofiltros, bioacumulación y sistemas multitróficos (Campanati et al., 2021).

Ante esta realidad, es indispensable identificar los impactos y oportunidades dentro del sector acuícola para maximizar sus beneficios y reducir sus efectos negativos.

Gestión sostenible del agua en acuicultura

El agua es un recurso esencial para la vida y cada vez más vulnerable debido al cambio climático, la contaminación y la sobreexplotación. En la acuicultura, su uso eficiente es crucial para garantizar la viabilidad y sostenibilidad del sector.

La economía circular aplicada al recurso hídrico promueve cerrar el ciclo del agua: maximizar su uso, reducir el desperdicio y reutilizarla múltiples veces. Este enfoque contrasta con el modelo lineal tradicional de extracción, uso y eliminación. Su implementación en la acuicultura permite mantener el valor del agua por más tiempo y disminuir la presión sobre fuentes convencionales, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Martínez et al., 2022).

La optimización del recurso hídrico puede lograrse mediante prácticas como la eliminación del recambio, el reúso de efluentes dentro del mismo sistema o su utilización en el cultivo de otras especies animales o vegetales (Martínez et al., 2022). Estas estrategias no solo favorecen la eficiencia del uso del agua, sino que también apoyan la resiliencia frente a crisis hídricas y contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Banco Mundial, 2019; Rodríguez et al., 2020).

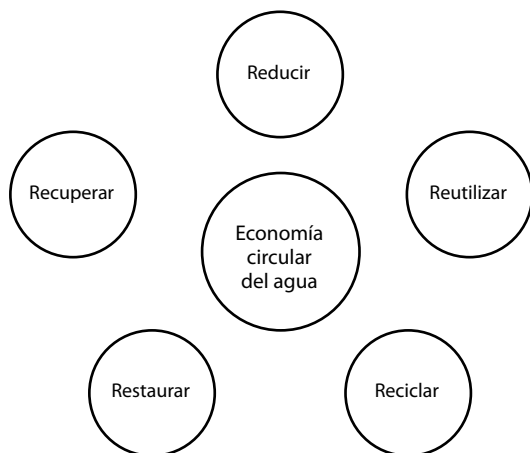
Las aguas residuales acuícolas deben considerarse un recurso valioso desde esta perspectiva (WWAP, 2017). La figura 10.7 muestra los principios fundamentales de la economía circular del agua.

Bajo este paradigma, se comprende: reducir el consumo y las pérdidas de agua en los procesos; reutilizar las aguas residuales, asegurando su calidad para la acuicultura; reciclar el agua dentro del sistema productivo aumentando su eficiencia; restaurar la calidad del agua para proteger la salud y los ecosistemas acuáticos, y; recuperar el agua para otros usos beneficiosos.

Además, es esencial fomentar el uso de fuentes alternativas como el agua de lluvia o aguas residuales tratadas, lo cual contribuye a disminuir la presión sobre acuíferos y cuerpos superficiales (Rivera y Donoso, 2020).

La reutilización del agua también permite recuperar subproductos valiosos que, en sistemas abiertos, se pierden. Por ejemplo, los lodos forma-

Figura 10.7. Principios fundamentales de la economía circular en agua



Fuente: elaboración propia con información de Rivera y Donoso (2020).

dos por restos de alimento y desechos de peces pueden convertirse en biogás o fertilizantes. Los nutrientes disueltos, como el nitrógeno y fósforo, son útiles en cultivos integrados como los sistemas acuapónicos.

Alimentación sostenible en acuicultura.

La alimentación para especies acuícolas representa una de las principales áreas de mejora para lograr una acuicultura sostenible. Actualmente, los alimentos se basan en harina y aceite de pescado, insumos de alto valor nutricional pero cuestionados por su origen: especies marinas de bajo valor comercial capturadas exclusivamente para este fin, lo que puede comprometer la biodiversidad y el equilibrio ecológico (Bandara, 2018; Tacon y Metian, 2008; Tesser y Torres, 2022). Asimismo, existe una competencia por el uso de diversas materias primas requeridas para la elaboración de alimentos balanceados acuícolas, debido a su demanda en otras actividades, como el consumo humano.

Debido a lo anterior, este modelo no es sostenible a largo plazo, ya que ningún recurso pesquero o agrícola podría abastecer la creciente demanda global. Por ello, es necesario desarrollar alternativas de dietas sostenibles y

accesibles. El uso de harina de pescado ha disminuido progresivamente en países europeos, por ejemplo, siendo reemplazada por ingredientes vegetales. Sin embargo, estos también pueden generar controversias, al competir con el consumo humano directo. En este contexto, los subproductos agrícolas representan una opción viable: son abundantes, económicos, y su uso presenta menor competencia con la alimentación humana.

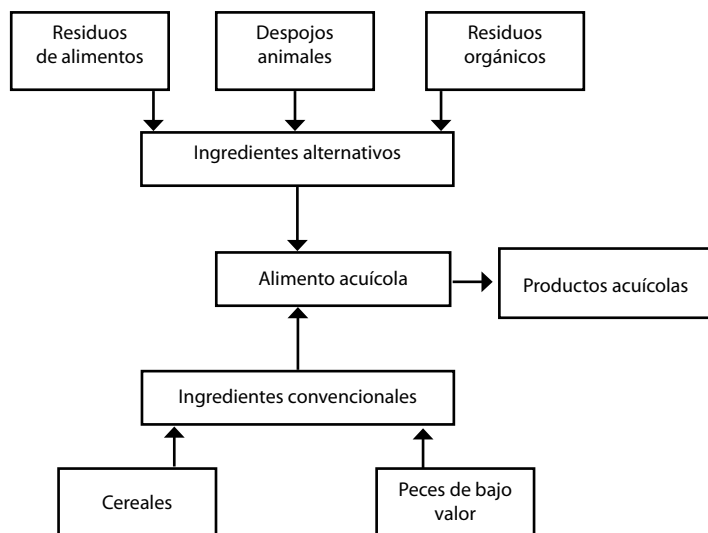
El aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de hogares, industrias y agricultura, comúnmente desaprovechados y mal gestionados, también puede aportar soluciones. En varios países se han implementado modelos de economía circular que reutilizan estos residuos para producir subproductos útiles en otras industrias.

La conversión de residuos alimentarios en alimentos balanceados para animales es una práctica consolidada en muchos lugares (Cheng, 2016), y su extensión a la acuicultura podría reducir costos de producción, disminuir la presión ambiental y mitigar el cambio climático (Akankali, 2015).

Se han identificado otras fuentes proteicas sostenibles, aunque la harina y el aceite de pescado siguen siendo insumos clave por su alto contenido proteico (Castillo et al., 2019). Subproductos de las industrias ganadera, avícola y pesquera pueden ser aprovechados, especialmente considerando que hasta el 75% del peso seco de un pez está compuesto por proteínas (Portz y Furuya, 2013). Por ejemplo, la sangre animal contiene hasta un 90% de proteínas, lo que representa una alternativa valiosa para disminuir la dependencia de recursos pesqueros (figura 10.8).

Valorización de residuos acuícolas

Los residuos generados por la industria acuícola como cabezas, vísceras, espinas, piel y aletas son ricos en compuestos bioactivos con alto valor agregado (Ghosh et al., 2016). Tradicionalmente desechados, estos subproductos pueden ser transformados en ingredientes para alimentos, cosméticos, fertilizantes y biomateriales (Smichi et al., 2016; Ozyurt et al., 2017). Así mismo, en diversos países la piel de pescado, tras un proceso de curtido, se transforma en un biomaterial resistente, idóneo para la manufactura de bienes como artículos de marroquinería (bolsas, cinturones, carteras), ac-

Figura 10.8. *Insumos convencionales y alternativos del alimento acuícola*

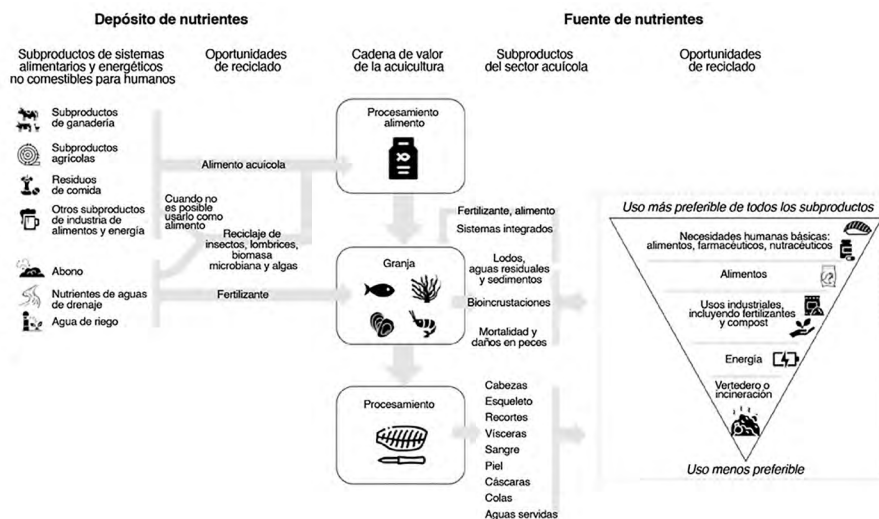
Fuente: elaboración propia.

cesorios de moda (collares, aretes, correas de reloj), y aplicaciones textiles y los huesos son utilizados para la elaboración de artesanías, contribuyendo al desarrollo de cadenas de valor sostenibles, las especies más utilizadas son: la corvina, el salmón y la tilapia, siendo este último por la dureza de su piel y tamaño de escamas el más utilizado (Duraismy et al., 2016; Santos-Correa et al., 2021).

La valorización de residuos generados por la industria acuícola ha avanzado más allá de la producción convencional de harina y aceite de pescado. Hoy se exploran aplicaciones innovadoras alineadas con los principios de la economía circular como: síntesis de ácidos grasos omega-3 para alimentos funcionales y suplementos (Ghaly et al., 2013) tanto para animales como humanos; la producción de ensilados para alimentación animal (Ramírez-Ramírez et al., 2020); la generación de bioenergía (biogás y biodiésel) (Torres, 2024) y en la medicina como injertos de piel (Gómez et al., 2023).

La valorización integral de estos residuos no solo reduce los impactos ambientales negativos (figura 10.9), sino que también promueve la innovación, fortalece las economías locales, genera empleo y apoya el desarro-

Figura 10.9. Oportunidades de reciclaje en la cadena de valor de la acuicultura para subproductos del sistema alimentario y en otros sectores para subproductos de la acuicultura



Fuente: modificado de Chary et al. (2024).

llo sostenible de comunidades pesqueras, en armonía con la conservación de los ecosistemas costeros y marinos.

Debe seguirse una jerarquía de recuperación de biomasa al reciclar subproductos del sistema alimentario a la cadena de valor en la acuicultura (lado izquierdo de la figura) y al reciclar subproductos de la acuicultura (lado derecho de la figura), para evitar que ingredientes aptos para el consumo humano terminen siendo utilizados como alimento para animales o fertilizante en sistemas acuícolas (Chary et al., 2024).

Conclusión

Si bien la acuicultura es una actividad con alto potencial de desarrollo, la gestión de los recursos y residuos representa una oportunidad clave para su sostenibilidad. Este potencial puede aprovecharse mediante el uso de sistemas de recirculación que optimicen el uso del agua y maximicen su capacidad productiva, aplicando los principios fundamentales de la economía circular. Asimismo, la implementación de tecnologías para la revalorización

de los residuos generados permite reemplazar el modelo lineal de producción, fortaleciendo así a la acuicultura como una actividad sostenible.

La transformación del modelo acuícola tradicional hacia uno basado en la economía circular no solo es necesaria, sino posible. Los SRA permiten avanzar hacia un paradigma más resiliente, eficiente y equitativo, donde la producción de alimentos acuáticos contribuya al bienestar humano sin comprometer la salud de los ecosistemas. Para lograrlo, será indispensable articular esfuerzos entre el gobierno, la academia, el sector productivo y la sociedad civil.

Referencias

- Akankali, J. A. y Nwafili, S. A. (2015). Management of organic waste impacts on the environment: Utilization as fish feed. *International Journal of Development and Sustainability*, 4(5), 513-528. <https://www.isdsnet.com/ijds>
- Bandara, T. (2018). Alternative feed ingredients in aquaculture: Opportunities and challenges. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(2), 3087-3094.
- Banco Mundial. (2019). *Efficient and effective management of water resource recovery facilities*. <https://www.worldbank.org>
- Campanati, C., Willer, D., Schubert, J. y Aldridge, D. (2021). Sustainable intensification of aquaculture through nutrient recycling and circular economies: More fish, less waste, blue growth. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*. <https://doi.org/10.1080/23308249.2021.1897520>
- Castillo, G. W. E., Sánchez, S. H. A. y Ochoa, M. G. M. (2019). Evaluación del ensilado de residuos de pescado y de cabeza de langostino fermentado con *Lactobacillus fermentus* aislado de cerdo. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(4), 1456-1469. <https://doi.org/10.15381/rivp.v30i4.17165>
- Chary, K., Riel, A., Muscat, A. et al. (2024). Transforming sustainable aquaculture by applying circularity principles. *Reviews in Aquaculture*, 16(2), 656-673. <https://doi.org/10.1111/raq.12860>
- Cheng, J. Y. K. y Lo, I. M. C. (2016). Investigation of the available technologies and their feasibility for the conversion of food waste into fish feed in Hong Kong. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 7169-7177. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4668-3>
- Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (Conapesca). (2023). *Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2023*.
- Duraisamy, R., Shamen, S. y Abiyu, B. (2016). A review of bio-tanning materials for processing of fish skin into leather. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 39(1), 10-20.

- Flores-Aguilar, P., García-Trejo, J. F. y Martínez-Guido S. I. (2020) Acuaponía: Una alternativa versátil e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. *Digital Ciencia*, 13(1), 43-53.
- Gallego A. I. (2010). *Evaluación y modelación de un tren de tratamiento de agua residual acuícola con recirculación y del cultivo de trucha arco iris alimentado por cosecha pluvial* [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3720.1761>
- Ghaly, A. E., Ramakrishnan, V. V., Brooks, M. S., Budge, S. M. y Dave, D. (2013). Fish processing wastes as a potential source of proteins, amino acids and oils: A critical review. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 5(4), 107-129. <https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000110>
- Ghosh, P. R., Fawcett, D., Sharma, S. B. y Poinern, G. E. J. (2016). Progress towards sustainable utilization and management of food wastes in the global economy. *International Journal of Food Science*, 1-22. <https://downloads.hindawi.com/journals/ijfs/2016/3563478.pdf>
- Gómez, L. A., González-Sierra, K. T., Carvajalino-Gutiérrez, Y. A. y Cortés-Amaya, S. S. (2023). Xenoinjertos de piel de tilapia en quemaduras cutáneas: Una revisión exploratoria. *Cirugía Plástica Ibero-Latinoamericana*, 49(3), 309-314. <https://doi.org/10.4321/s0376-78922023000300014>
- Hernández-Mancipe L. E., Lodoño-Velez J. I., Hernández-García K. A. y Torres-Hernández L. C. (2019). Los sistemas biofloc: Una estrategia eficiente de la producción acuícola. *Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 14(1), 70-99.
- Martínez, L. R., Martínez Porchas, M. M. P., Robles Porchas, G. R. y Garibay Valdez, E. (2022). Alternativas de acuicultura sostenible: Aspectos nutricionales. *Avances en Nutrición Acuícola*, 1(1), 245-262. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/369>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2020). *The state of world fisheries and aquaculture 2020*. Fisheries and Aquaculture Department. <https://www.fao.org/publications/sofia/2020/en/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2024). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024: La transformación azul en acción*. <https://doi.org/10.4060/cd0683es>
- Ozyurt, G., Boga, M., Uçar, Y., Boga, E. K. y Polat, A. (2017). Chemical, bioactive properties and in vitro digestibility of spray-dried fish silages: Comparison of two discard fish (*Equulites klunzingeri* and *Carassius gibelio*) silages. *Aquaculture Nutrition*, 1-8. <https://doi.org/10.1111/anu.12636>
- Portz, L. y Furuya, W. M. (2013). Energía, proteína e aminoácidos. In D. Fracalossi y J. Cyrino (Eds.), *Nutriaqua: Nutrição e alimentação de espécies de interesse para a aquicultura brasileira* (pp. 65-78). Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática.
- Santos-Correa, S., de Souza, L., Chimbida, J., Franco, M., Matiucci, M., Mesquita, D., Rodríguez de Souza, M., Feiden, A. y Silva da Olivera, J. (2021). Avaliação mecânica,

- morfológica e fisicoquímica, de couros de corvina, pescada amarela e tilápia. *Research, Society and Development*, 10(15), 1-15.
- Ramírez-Ramírez, J., Loya-Olguín, J., Ulloa, J., Rosas-Ulloa, P., Gutiérrez-Leyva, R. y Silva-Carrillo, Y. (2020). Aprovechamiento de desechos de pescado y cáscara de piña para producir ensilado biológico. *Abanico Veterinario*, 10, e116. <https://doi.org/10.21929/abavet2020.29>
- Rivera Bravo, D. y Donoso, G. (2020). *Desafíos del reúso de aguas residuales tratadas en Chile*.
- Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D. y Saltiel, G. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*.
- Smichi, N., Kharrat, N., Achouri, N., Gargouri, Y., Miled, N. y Fendri, A. (2016). Physico-chemical characterization and nutritional quality of fish by-products: *In vitro* oils digestibility and synthesis of flavour esters. *Journal of Food Processing & Technology*, 7(7), 602. <https://www.longdom.org/archive/jfpt-volume-7-issue-7-year-2016.html>
- Tacon, A. G. J. y Metian, M. (2008). Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects. *Aquaculture*, 285(1-4), 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.08.015>
- Tesser, M. y Torres Rosas, V. (2022). Uso de alimentos no convencionales en acuicultura: Estudios realizados en la Universidad Federal de Rio Grande – FURG. *Avances en Nutrición Acuicola*, 1(1), 415-431. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/387>
- Tidwell, H. J. (2012). *Aquaculture production systems*. Wiley-Blackwell.
- Timmons, B. M., Ebeling M. J. y Piedrahita H. R. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación Cayuga Aqua Ventures*. Ithaca.
- Torres, E. (2024). La transformación de los residuos, una clave para la producción de energía. *Ambiociencias*, 93-110. <https://doi.org/10.18002/ambioci.i21.8186>
- United Nations World Water Assessment Programme (WWAP). (2017). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017: Aguas residuales, el recurso desaprovechado*. UNESCO.