OCTUBRE 2026 | VOL. 6 | NÚMERO 4

EL ACUICULTOR

UNA REVISTA DE LA **SVA**



SISTEMA DE POLICULTIVO DE CAMARONES Y ALGAS MARINAS COMO ENFOQUE SOSTENIBLE DE LA ACUICULTURA
PÁGINA 17

TRAZABILIDAD EN ACUARIOS MARINOS: ¿CAPTURADOS O CULTIVADOS?
PÁGINA 55

EL ROL DE LAS MUJERES EN LA ECONOMÍA AZUL Y LA SEGURIDAD ALIMENTARIA MARINA
PÁGINA 34

LLEVANDO LA BIOSEGURIDAD DE LA CAMARONICULTURA AL SIGUIENTE NIVEL CON IONIZACIÓN DE ALTA ENERGÍA EN POLIQUETOS
PÁGINA 74

OCTUBRE 2026 | VOL. 6 | NÚMERO 4

EL ACUICULTOR

UNA REVISTA DE LA **SVA**

JUNTA DIRECTIVA

PRESIDENTE
Eduardo Castillo

VICEPRESIDENTE
Alex Guevara

SECRETARIO
Daniel Arana

TESORERO
Víctor Blanco

VOCALES
Abraham Mora
Germán Poleo
Edwis Bravo
Oswaldo Marín

SUPLENTES
Juan Urich
Eugenio García
Héctor Rincón

EQUIPO OPERATIVO

DIRECTOR EJECUTIVO
Arnaldo Figueredo

DIRECTOR EDITORIAL
Alex Guevara

DIRECTOR DE MEDIOS
Víctor Cabezuelo

ASISTENTE DE MEDIOS
Rosa Delgado

CONSULTORES
Marcia Guevara
Wander Parada

GRACIAS A NUESTROS PATROCINANTES

MEGASUPPLY · Prilabsa · TRICAL DE VENEZUELA C.A. · febeca mayor de ferretería · ADDIGRAINS, C.A. La Evolución es Nuestra Clave



¡COMPROMETIDOS CON EL DESARROLLO ACUÍCOLA DE LA REGIÓN!

Y DEMÁS ALIADOS

GRUPO LAMAR · MOTIV · BIOLAN · GEO-POL DE VENEZUELA C.A. · LAMARSA LABORATORIOS MARINOS, S.A.

Revolution Seaweed · BALANCEADOS LAMAR, C.A. · TIDE · INMARLACA INVERSIONES MARINAS DEL LAGO, C.A. R.I.F.: J-30711765-6 · FUNDEMAR Fundación de Especies Marinas R.I.F: J-50055804-0 · BiorMa Aquaculture Biotecnología de Organismos Marinos

CONTACTO

Web: svacuicultura.org / **Email:** sociedadvenezolanadacuicultura@gmail.com

@svacuicultura · Sociedad Venezolana de Acuicultura

CONTENIDO

OCTUBRE 2026 | VOL. 6 | NÚMERO 4

Pág. / Contenido



05. Editorial: Sigue alcanzando reconocimientos la alguicultura venezolana

06. Comprensión y mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la acuicultura: una revisión de las fuentes de emisión, las tendencias regionales y las vías de sostenibilidad

17. Sistema de policultivo de camarones y algas marinas como enfoque sostenible de la acuicultura

25. Evaluación comparativa del rendimiento productivo de *Kappaphycus alvarezii*: Eficiencia técnica de los sistemas de cultivo por long line y balsa flotante

34. El rol de las mujeres en la economía azul y la seguridad alimentaria marina

39. Hacia la aplicación de un marco de circularidad en los piensos de acuicultura

48. Más allá del *Vibrio*: Innovaciones diagnósticas y manejo estratégico para la reducción de la mortalidad en la camaronicultura

55. Trazabilidad en acuarios marinos: ¿capturados o cultivados?

60. Valerse por sí mismas: Las mujeres que dominan la acuicultura en Kenia

69. Las alertas frecuentes de IA no hacen seguras a las granjas acuícolas: la explicabilidad y la confianza son lo primero

74. Llevando la bioseguridad de la camaronicultura al siguiente nivel con ionización de alta energía en poliquetos



Nota: Las opiniones emitidas en los artículos corresponde a los autores y no deben ser atribuidas a la Sociedad Venezolana de Acuicultura





TOMOTA

¡Cada camarón cuenta!

Datos precisos.
Decisiones inteligentes.
Producción más eficiente.



A3
Gestión óptima del agua



S3+
Monitoreo del crecimiento



S3N
Recuento de nauplios y Artemia



S3T
Evaluación calidad de postlarvas

Hagamos acuicultura juntos

MEGASUPPLY®

Distribuidor Exclusivo – Centroamérica y Venezuela www.megasupply.net orders@megasupply.net

EDITORIAL

SIGUE ALCANZANDO RECONOCIMIENTOS LA ALGUICULTURA VENEZOLANA

El sector alguicultor venezolano dio sus primeros pasos hace poco más de tres décadas, pero su impulso productivo destacado inició hace menos de una década. Tan significativo ha sido ese crecimiento que hoy el sector descolla nacional e internacionalmente en varios aspectos.

Primeramente, en el plano nacional, de ser desconocida, la alguicultura pasó a ser una de las actividades económicas que más contribuyen a las exportaciones del país. Aunque muy pocas zonas han sido autorizadas para operar cultivando algas, las producciones han sido suficientes para posicionarla entre los cinco rubros que lideran los ingresos no petroleros.

Otro reconocimiento viene en la persona de Raúl Rincones, pionero de esta actividad. Él fue el primero en hacer conocer las algas venezolanas en mercados foráneos. Sus aportes se multiplicaron nacional e internacionalmente. En años recientes, Rincones ha actuado brindando talleres y asesorías como experto para la FAO, organización de referencia global en temas agroalimentarios, lo cual constituye un testimonio de su valía profesional y del nivel técnico del país en ese rubro.

De seguido se indican algunos de los numerosos logros de TIDE. Primeramente, la diversificación de la presencia de nuestros productos ficológicos en los mercados globales (Chile, Rusia, Turquía, China, entre muchos otros), a través de su CEO, Hoce Fariñas. Por otra parte, digna representación del país en eventos de envergadura, como el Seaweed Pre-COP30 (Brasil), el Seaweed Biostimulants Roundtable (EEUU) o Women in Ocean Food (México), donde María Gabriela Reyes (CFO) fue galardonada como Best Speech. Adicionalmente, la muy positiva valoración generada ante Sea Hatch, ente internacional de promoción de crecimiento sostenible e innovación, y The Fish Site, una de las plataformas noticiosas más relevantes del sector acuícola internacional.

Más recientemente, Suplitutto Agrocommodities 2020 fue galardonada en el UNIDO-WTCA Blue Economy Global Call 2026, en la categoría Sustainable Blue Food, premiando conceptos como el cultivo regenerativo de macroalgas para la resiliencia costera.

Gracias al trabajo de estas personalidades y organizaciones, la alguicultura venezolana se ha posicionado como uno de las referentes productivos más importantes, a nivel latinoamericano, y como un elemento de valor de la economía azul, a nivel global. Felicitaciones a todos ellos.

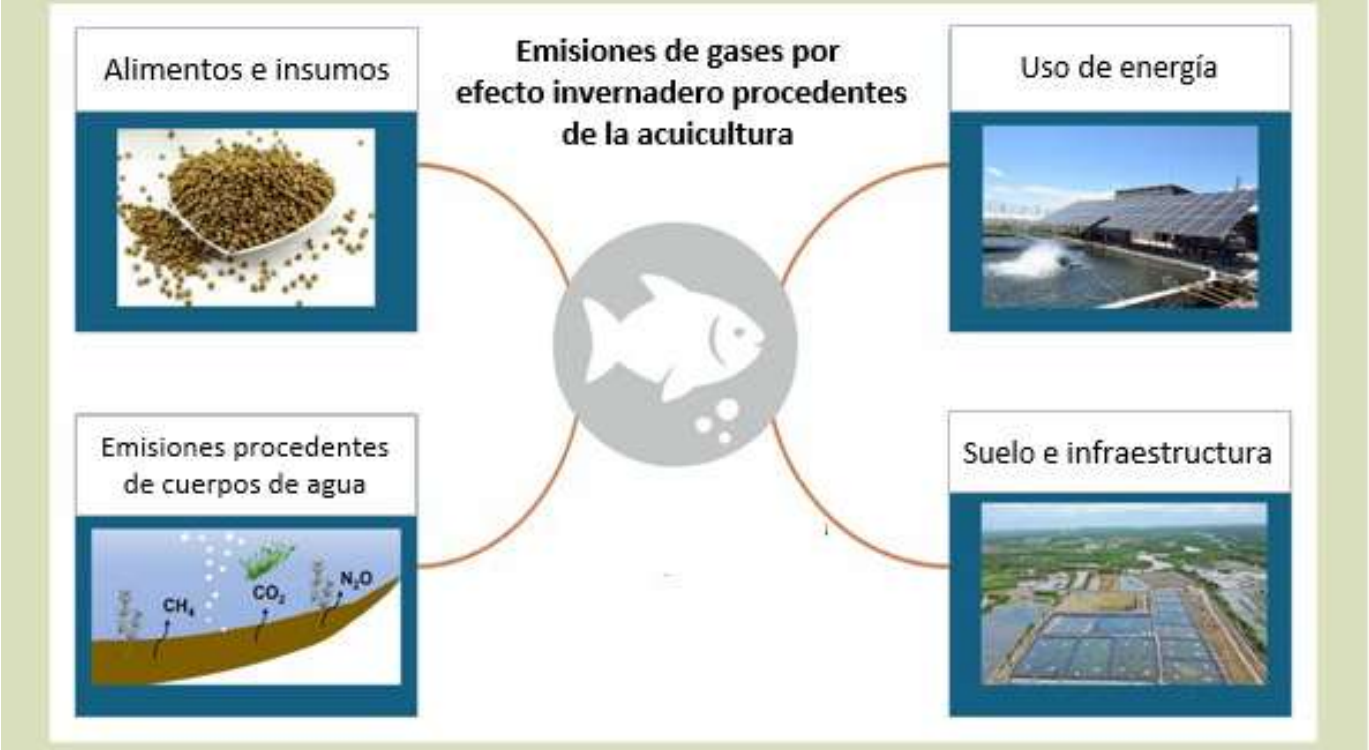




Eduardo Castillo
Presidente de la SVA

COMPRENSIÓN Y MITIGACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA ACUICULTURA: UNA REVISIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN, LAS TENDENCIAS REGIONALES Y LAS VÍAS DE SOSTENIBILIDAD

Cuerpo editorial de El Acuicultor



Introducción

La acuicultura ha crecido notablemente en respuesta a la creciente demanda de mariscos y peces, lo que ha generado preocupaciones ambientales, especialmente en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Estas emisiones provienen de diversas fuentes como la producción de alimentos, el consumo de energía y procesos biológicos en los entornos acuáticos, así como el procesamiento posterior a la cosecha.

Aunque la acuicultura emite menos GEI por unidad de proteína en comparación con la ganadería, sus emisiones totales son significativas, lo que hace necesario incluirla en los esfuerzos globales para mitigar el cambio climático.

La investigación sobre estrategias de mitigación sigue estando relativamente poco examinada; por ello, en este artículo buscamos abordar algunos temas clave como: (1) las fuentes de emisiones de GEI en sistemas de acuicultura, (2) las variaciones en las emisiones por especie y sistema de producción, (3) la distribución espacial y puntos críticos de emisión, y (4) las estrategias disponibles para mitigar las emisiones.

1.- Fuentes de emisión en la acuicultura

Los sistemas acuícolas tienen dinámicas de GEI complejas, con potencial tanto para emisiones netas como para absorción de carbono. Comprender las fuentes de estas emisiones es esencial para desarrollar estrategias de mitigación específicas. Dichos gases provienen de una cadena de suministro multifacética, cuyas principales fuentes incluyen la producción y utilización de alimentos, el consumo de energía en las granjas, los procesos biogeoquímicos en entornos acuáticos (que generan CH_4 y N_2O), los cambios en el uso del suelo asociados con el establecimiento de infraestructura acuícola, y las actividades relacionadas con el procesamiento y el transporte poscosecha. La contribución relativa de estas fuentes depende de la especie y del sistema de cultivo.

Alimentos e insumos

La producción de alimentos para la acuicultura genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), a lo largo de un ciclo que incluye la obtención de materias primas, su procesamiento y su distribución. Este proceso requiere un alto consumo energético y está vinculado al cambio de uso del suelo y al transporte. La eficiencia en las granjas acuícolas también afecta a estas emisiones, ya que el alimento no asimilado contribuye a la generación de GEI en los fondos acuáticos. Para mitigar el impacto ambiental, es crucial optimizar los índices de conversión alimenticia y adoptar ingredientes alternativos de menor impacto.

Uso de energía

El consumo de energía en la acuicultura es un factor crítico para su huella ecológica, principalmente debido al uso de combustibles fósiles que generan altas emisiones de dióxido de carbono (CO_2). La demanda energética varía según la complejidad del sistema de cultivo: las explotaciones tradicionales requieren menos energía, mientras que los modelos intensivos, como la industria camaronera y la salmonicultura de alta tecnología, presentan una alta dependencia energética. En el caso de la salmonicultura noruega, el uso de diésel, electricidad y sistemas automatizados contribuye significativamente a las emisiones de GEI. A pesar de que innovaciones como los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) buscan mitigar el impacto ambiental, su alta demanda energética para el bombeo y filtrado genera un balance complejo, donde los beneficios locales se ven contrarrestados por un aumento en las emisiones globales.

Emisiones procedentes de cuerpos de agua

La acuicultura emite gases de efecto invernadero (GEI), siendo el metano (CH_4) el más relevante debido a su elevada generación por la descomposición anaeróbica de la materia orgánica en los sedimentos; este gas posee un potencial de calentamiento global

de 27 a 30 veces mayor que el del CO_2. En estanques de agua dulce, las emisiones de CH_4 superan las de CO_2 y óxido nitroso (N_2O), especialmente en áreas de alimentación. Aunque las emisiones de N_2O son menores, su alto potencial de calentamiento las hace significativas. Estas bajas emisiones se deben a condiciones ambientales poco favorables para su producción, proceso que ocurre a través de la nitrificación y desnitrificación en presencia de amonio y nitrato.

Suelo e infraestructura

El desarrollo de la acuicultura conlleva cambios en el uso de la tierra que generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero, como CO_2 y CH_4, al perturbar ecosistemas que almacenan carbono. En las granjas ya establecidas, prácticas como el drenaje de estanques exponen los sedimentos orgánicos al aire, lo que aumenta la liberación de estos gases. La construcción de infraestructura acuícola también contribuye a las emisiones iniciales de carbono. Asimismo, las etapas posteriores a la cosecha, como el procesamiento, el empaque y el transporte, generan emisiones adicionales; en particular, el transporte aéreo de la industria del salmón es responsable de una huella de carbono considerable.

2.- Diferencias entre especies y sistemas de emisiones

La acuicultura implica el cultivo de una amplia gama de especies, incluyendo peces, crustáceos, moluscos y algas, en diversos sistemas de producción, como estanques, jaulas, canales y sistemas de recirculación acuícola (RAS). Las emisiones de GEI asociadas a estas prácticas difieren significativamente según la especie y el método de producción utilizado (**Tabla 1**). Reconocer estas variaciones es esencial para identificar áreas clave de reducción de emisiones, así como para fundamentar tanto las decisiones de los consumidores como el desarrollo de políticas públicas.

Acuicultura sin alimentación: bivalvos y algas (bajas emisiones)

Los sistemas acuícolas no alimentados, como el cultivo de bivalvos y algas marinas, generan las menores emisiones de gases de efecto invernadero al obtener nutrientes de forma natural y requerir pocos insumos energéticos. Estas prácticas no alteran el uso de la tierra y tienen un impacto ambiental mínimo; incluso pueden presentar huellas de carbono netas negativas gracias a su capacidad para secuestrar CO_2. Por ejemplo, la cosecha de 1 kg de almejas secuestra 254 g de CO_2, emite solo 22 g. Además, al no requerir fertilizantes ni agua dulce, su impacto ambiental resulta aún menor. Los bivalvos son especialmente eficientes en la producción de proteínas, lo que contribuye a bajas intensidades de emisión y a un reducido consumo de agua. En conclusión, este tipo de acuicultura representa una opción sostenible y de bajo impacto.

Peces y crustáceos alimentados: rango de emisiones bajas a altas

Las emisiones de GEI en acuicultura varían según la especie y las prácticas de cultivo. Factores como la eficiencia de conversión alimenticia, el tipo de dieta (herbívora o carnívora), y el sistema de producción (intensivo o extensivo) influyen en estas diferencias. Especies como la carpa asiática, la tilapia y el sábalo generan bajas emisiones, mientras que el bagre y el salmón, que requieren dietas ricas en proteínas, registran un mayor impacto. Por ejemplo, el cultivo intensivo de bagre puede emitir tanto GEI como la producción de carne de res. Aunque los salmónidos tienen una eficiencia de conversión adecuada, sus emisiones pueden oscilar entre 0,7 y 14 kg

Tabla 1. Intensidad de gases de efecto invernadero para diferentes productos de acuicultura.

Producto y sistema acuícola	Intensidad aproximada de GEI (kg/kg CO_2 -eqv prod. comestible)	País o región
Bivalvos; balsa, sin alimento	~0 o negativo	Italia
Algas marinas (kelp); cuerdas	~0	Global
Carpa (estanque)	1,84	India
Tilapia (semi-intensivo)	~2–4	Global
Bagre (intensivos con aireación)	~6–8	EE.UU
Bagre rayado (estanque)	1,37-8,93	Vietnam
Salmón (jaula)	~3,8	Noruega
Trucha (flujo continuo)	1,78	España
Camarones (semi-intensivo)	~5–6	China
Camarones (superintensivos)	~20+	China
Acuicultura integrada (peces + algas + mariscos)	Varía, generalmente < que el monocultivo.	China

CO_2-eqv/kg de producto, dependiendo de la práctica. Por su parte los camarones, como *Penaeus vannamei*, pueden alcanzar hasta 24 kg CO_2-eqv/kg en sistemas intensivos, mientras que las carpas y las tilapias son más sostenibles, con emisiones en torno a los 2,03 kg CO_2-eqv/kg gracias a su dieta y sistemas semi-intensivos. En resumen, la alimentación, el método de cultivo y la eficiencia energética determinan las asimetrías en las emisiones acuícolas.

Influencia de la intensidad del sistema agrícola

La intensidad del sistema de cultivo impacta en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producción, lo que varía incluso dentro de la misma especie. Por ejemplo, en la acuicultura de camarón, los sistemas semi-intensivos generan menos emisiones que los superintensivos. En el cultivo de carpas, los estanques de policultivo con insumos mínimos muestran bajas emisiones, pero también bajos rendimientos; en contraste, los monocultivos intensivos presentan mayores rendimientos y emisiones. Esto refleja una relación no lineal, ya que la intensificación puede reducir la eficiencia alimentaria y aumentar la demanda energética. En Vietnam, los sistemas integrados de cultivo de arroz y peces que usan geomembranas y aditivos microbianos pueden reducir las emisiones de CH_4 y N_2O, logrando una menor huella ambiental. Sin embargo, estos beneficios podrían incentivar una mayor intensificación, como un aumento en la frecuencia de cultivo o en la densidad de siembra, lo que debe ser gestionado para evitar contrarrestar las mejoras.

3.- Patrones geográficos y puntos críticos

La distribución espacial de las emisiones de GEI de la acuicultura está influenciada principalmente por las ubicaciones donde la producción acuícola se concentra con mayor intensidad y por los métodos de cultivo predominantes en dichas zonas. Las variaciones en la intensidad de las emisiones y las técnicas de producción implican que incluso aquellos países con niveles de producción más bajos pueden representar importantes focos de emisiones si sus prácticas son especialmente intensivas en carbono.

Distribución mundial de las emisiones de la acuicultura

En 2018, la acuicultura global emitió aproximadamente 261 TM de CO_2-eqv, principalmente por el uso de energía y los procesos alimentarios. Asia, liderada por China, es responsable de más de la mitad de estas emisiones; así, los países tropicales y subtropicales en desarrollo son los principales emisores, debido sobre todo a la acuicultura en estanques y la deforestación. En contraste, los países desarrollados como Canadá, la UE, Japón, Noruega y EE.UU. tienen emisiones totales más bajas, pero registran valores más altos por unidad de producción debido a su dependencia energética. Otras regiones como Europa, América del Norte y América Latina también contribuyen al sector, especialmente con especies como el salmón y la trucha. En África, el sector es limitado, allí destaca Egipto como un importante productor de tilapia, con emisiones moderadas relacionadas con sistemas de estanques, mientras que otras naciones africanas están en desarrollo en esta área.

Iniciativas y consideraciones regionales

Las emisiones de gases de efecto invernadero varían entre regiones, presentando diferentes desafíos y oportunidades de mitigación. En Europa, especialmente Noruega, las regulaciones de sostenibilidad han llevado a la búsqueda de alternativas de alimentación bajas en carbono y mejoras en la logística de transporte, con el objetivo de lograr una acuicultura climáticamente neutra. En Asia, China promueve enfoques ecológicos como la piscicultura integrada de arroz y peces, que genera menores emisiones. Sin embargo, aún falta un marco político adecuado para desarrollar sistemas de acuicultura de bajas emisiones.

El comercio global de productos acuícolas permite la transferencia indirecta de emisiones; por ejemplo, el cultivo de camarones en Asia y la producción de salmón en Chile y Canadá impactan directamente en la huella de carbono de los productos consumidos en Europa. En contraste, las emisiones derivadas del consumo de pescado de bajo valor en China tienden a permanecer dentro del país. Por ende, el diseño de estrategias efectivas de mitigación puede requerir que los mercados consumidores, como la UE, Japón y EE.UU., apoyen normativas que fomenten prácticas de producción de bajo carbono en los países de origen.

4.- Estrategias de mitigación para la reducción de emisiones

Debido a la amplia gama de fuentes de emisión asociadas con la acuicultura, mitigar eficazmente las GEI requiere una estrategia integral y multifacética (**Figura 1**). En la literatura científica se han evaluado diversos enfoques que incluyen modificaciones en la composición del alimento, avances en las prácticas de gestión de las granjas y

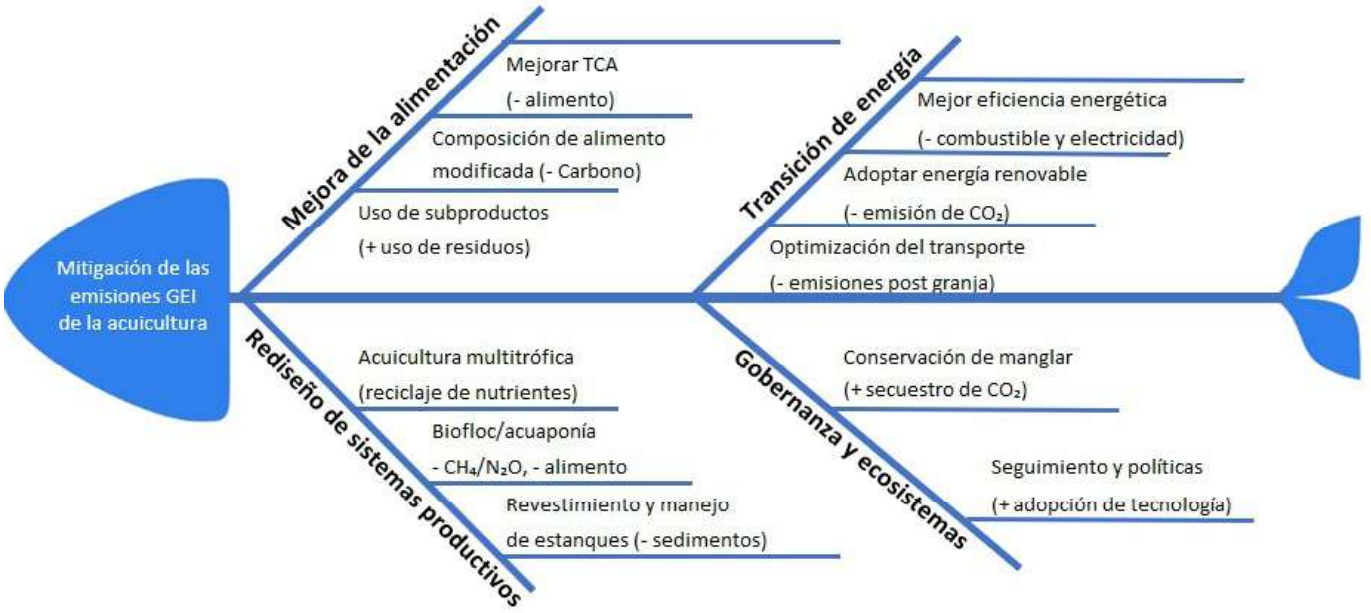


Figura 1. Estrategias de mitigación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la acuicultura.

rediseños sistémicos. Estas intervenciones suelen permitir la reducción de emisiones sin comprometer la productividad; además, varias de ellas ofrecen ventajas adicionales, como una mayor eficiencia o ahorros de costos a largo plazo.

Mejora de la eficiencia y composición de los alimentos

Optimizar la utilización y composición del alimento es crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la acuicultura, ya que su producción genera un impacto significativo. Disminuir la tasa de conversión alimenticia (TCA) permite emplear menos insumos por unidad de biomasa; de hecho, pequeñas mejoras en este indicador pueden traducirse en reducciones sustanciales. Esto se evidencia en la salmonicultura noruega, donde optimizaciones en la TCA podrían mitigar hasta un 60 % de las emisiones sectoriales. Entre las estrategias para alcanzar este objetivo destacan la cría selectiva, la prevención de la sobrealimentación y el fortalecimiento de la salud animal.

Modificar las formulaciones de los alimentos resulta fundamental, incorporando ingredientes de baja huella de carbono, como proteínas vegetales, harina de insectos y proteínas microbianas, aunque algunos cultivos pueden tener emisiones vinculadas al cambio de uso de la tierra. Fomentar el uso de subproductos pesqueros y desechos de procesamiento mejora la gestión de residuos. Materias primas innovadoras, tales como harinas de insectos y algas ofrecen oportunidades para reducir las GEI por unidad de proteína, siempre que estas transiciones mantengan el crecimiento y la salud óptimos de las especies cultivadas.

Eficiencia energética y energías renovables

Reducir la intensidad de carbono del consumo energético en la acuicultura es esencial para mitigar el cambio climático. Esto se logra mediante el uso de equipos más eficientes, como aireadores y bombas, y la adopción de fuentes de energía más limpias. En la industria noruega del salmón, la implementación de tecnologías de ahorro

energético y la optimización logística son estrategias clave. Por ejemplo, la integración de sistemas fotovoltaicos en las plantas de procesamiento puede mitigar casi por completo las emisiones asociadas, mientras que los sistemas de recirculación acuícola (RAS) se benefician directamente del acoplamiento a energías renovables. Adicionalmente, se exploran sistemas híbridos que combinan turbinas eólicas y energía undimotriz para la piscicultura marina, así como el reemplazo de embarcaciones diésel por alternativas eléctricas o propulsadas por biocombustibles.

Optimizar el transporte y las cadenas de suministro

Las emisiones del transporte en el sector de productos del mar pueden disminuirse ajustando la logística y la distribución. Es fundamental utilizar métodos de transporte más eficientes, como el marítimo o por carretera con aislamiento térmico, en lugar del aéreo para productos como el salmón. Esto podría requerir una reestructuración de los mercados para fomentar el consumo de productos congelados o procesados, así como relocalizar ciertas operaciones acuícolas cerca de los centros de consumo. Aunque aumentar la producción y el consumo local acorta la cadena de suministro, su viabilidad es compleja en países con un perfil marcadamente exportador como Noruega. Otras soluciones complementarias incluyen la consolidación de envíos, la modernización de los sistemas de cadena de frío para permitir tránsitos más lentos sin comprometer la calidad, y el procesamiento de los productos en su punto de origen para limitar el transporte exclusivamente a los componentes comestibles.

Mejora de la gestión del agua y los residuos

La mitigación de emisiones de CH_4 y N_2O en la acuicultura requiere prácticas de gestión en estanques y tanques. Para reducir CH_4, es clave limitar la acumulación de materia orgánica en los sedimentos mediante un manejo adecuado de la población y la alimentación, así como la introducción de especies bentónicas. Para disminuir N_2O, se debe evitar el exceso de nitrógeno controlando la alimentación y seleccionando dietas apropiadas. La acuicultura integrada, que incluye algas y plantas acuáticas, puede absorber nutrientes disueltos, reduciendo así las emisiones de N_2O, con la posibilidad de que cultivar vegetales junto a peces reduzca estas emisiones en más del 60 %.

El modelo de acuicultura multitrófica integrada (IMTA, por sus siglas en ingles), que combina peces con mariscos y algas, favorece la recuperación de nutrientes y reduce la eutrofización, al tiempo que las algas marinas contribuyen activamente al secuestro de CO_2.

Finalmente, la tecnología de biofloc transforma los desechos en biomasa microbiana que los peces pueden consumir, mejorando la eficiencia alimentaria y reduciendo la descarga de nutrientes. Esta tecnología se considera una estrategia de mitigación efectiva para la acuicultura del camarón, ya que cierra el ciclo de nutrientes y limita considerablemente la emisión de N_2O.

Diseño de sistemas y nuevas tecnologías

Reevaluar el diseño de sistemas acuícolas puede ser clave para mitigar el impacto ambiental. Los sistemas de recirculación acuícola (RAS) tienen el potencial de producir biomasa con mínimas emisiones directas y preservar hábitats naturales, siempre y cuando se utilicen energías renovables y se optimice la eficiencia energética. Aunque estos modelos enfrentan retos financieros y energéticos, dichos retos podrían aliviarse mediante el uso de paneles solares. Asimismo, la acuicultura de precisión, que utiliza sensores y automatización para optimizar la alimentación y minimizar el desperdicio, contribuye a la reducción de emisiones.

Por otra parte, existen iniciativas prometedoras de secuestro y compensación de carbono en el sector. El cultivo de algas marinas y bivalvos (como mejillones y almejas) muestra un potencial considerable para capturar CO_2, si bien la estabilidad del almacenamiento a largo plazo aún es incierta. Adicionalmente, la conservación y rehabilitación de ecosistemas de carbono azul, como los manglares, representa una vía eficaz para compensar las emisiones acuícolas. En este sentido, restaurar manglares adyacentes a los criaderos de camarones constituye una estrategia sólida para secuestrar CO_2; de hecho, algunos esquemas de certificación sostenible ya fomentan esta replantación para maximizar los beneficios ambientales.

Medidas de política y gestión

Para acelerar la transición, es esencial promover la adopción de tecnologías bajas en carbono mediante marcos regulatorios adecuados. Los gobiernos pueden ofrecer incentivos fiscales y subsidios para la transición hacia energías renovables y prácticas de alimentación sostenibles. Además, la acuicultura debe integrarse formalmente en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (GEI) y en las agendas de mitigación, fomentando una gobernanza sistémica que contemple el nexo entre alimentos, energía, agua y carbono.

El monitoreo y la presentación de informes sobre emisiones de GEI mejorarán la conciencia y permitirán evaluar el desempeño del sector, estimulando a los productores a obtener credenciales de bajas emisiones y avanzar hacia la neutralidad climática. Sin embargo, es importante tener en cuenta las posibles compensaciones ambientales. Por ejemplo, mientras los sistemas de recirculación acuícola (RAS) pueden reducir las descargas de nutrientes, también pueden incrementar la huella de carbono. Disminuir el contenido proteico en la alimentación puede reducir las emisiones de N_2O, pero afectar negativamente el crecimiento animal, prolongar los ciclos de cultivo, elevando el consumo de energético. Por lo tanto, una estrategia de mitigación efectiva debe priorizar resultados sinérgicos y gestionar compensaciones para evitar resolver un problema a expensas de otro.

Investigaciones futuras

Ante la continua expansión de la industria acuícola para satisfacer las demandas proteicas de una población mundial en aumento, resulta crucial abordar integralmente sus impactos ambientales. Las investigaciones futuras deben priorizar la optimización de las técnicas de evaluación de GEI, el desarrollo de medidas de mitigación eficaces y el diseño de marcos políticos que respalden la sostenibilidad a largo plazo del sector.

Avances en los métodos de cuantificación de GEI

La cuantificación precisa de los gases de efecto invernadero (GEI) es indispensable para implementar estrategias de mitigación efectivas, ya que los métodos de evaluación actuales a menudo no logran capturar la totalidad de las emisiones asociadas en los sistemas acuícolas. Tecnologías avanzadas, como los sistemas de covarianza de corrientes de Foucault (o eddy covariance), pueden proporcionar mediciones de alta resolución de los flujos de gas en estos entornos. Aunque el Departamento de Agricultura de los EE. UU. (USDA) ha elaborado protocolos estandarizados para evaluar emisiones en los sectores agrícola y forestal, dichas metodologías requieren una adaptación profunda a las particularidades de los ecosistemas acuáticos. Por lo tanto, la investigación futura debe centrarse en desarrollar marcos de evaluación holísticos y específicos para cada especie, incorporando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para lograr una determinación más precisa de la huella ambiental.

Evaluaciones integrales del ciclo de vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta indispensable para evaluar los impactos ambientales de los sistemas acuícolas. Sin embargo, los ACV convencionales suelen enfocarse de manera predominante en las emisiones directas, subestimando fuentes indirectas críticas como la producción de piensos, el consumo energético extra predial y el procesamiento poscosecha. Para comprender con mayor precisión la huella de carbono real del sector, las investigaciones futuras deben desarrollar ACV de alcance integral que abarquen toda la cadena de valor. Incorporar datos de alta resolución sobre el abastecimiento y transporte de los ingredientes de los alimentos balanceados revelará emisiones tradicionalmente omitidas, señalando así nuevos puntos críticos para la mitigación estratégica.

Tecnologías emergentes y análisis de datos

El aprovechamiento de las innovaciones tecnológicas ofrece un vasto potencial para transformar el monitoreo y la mitigación de los GEI en la acuicultura. La integración de herramientas de acuicultura de precisión, que incluyen sensores avanzados y sistemas automatizados, permite la supervisión continua de parámetros críticos como la calidad del agua y la eficiencia energética, lo que favorece una gestión de recursos significativamente más eficaz. Asimismo, la aplicación de analítica de big data y algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) facilita la identificación de patrones y la predicción de escenarios complejos, optimizando la toma de decisiones estratégicas orientadas a la descarbonización del sector.

Estrategias innovadoras de mitigación

La producción de piensos representa una fuente prioritaria de emisiones de carbono en el sector acuícola. La transición hacia insumos más sostenibles, como aquellos basados en proteínas vegetales o harinas de insectos, ofrece un potencial considerable para la reducción de emisiones. La incorporación de algas marinas en las formulaciones dietéticas ha demostrado su eficacia para mitigar las emisiones de CH_4 en el ganado rumiante, lo que sugiere un potencial de aplicación similar en la acuicultura. Además, el cultivo de algas marinas presenta una doble ventaja: proporciona un ingrediente alimentario de bajo impacto ambiental y actúa como sumidero de carbono mediante la fotosíntesis. No obstante, es fundamental profundizar en la investigación dentro de estas áreas emergentes.

Consideraciones geográficas y desarrollo de políticas

Las marcadas asimetrías regionales en las prácticas acuícolas exigen investigaciones específicas y contextualizadas a fin de determinar los enfoques de mitigación más eficaces. En el caso de Sudáfrica, por ejemplo, los estudios han revelado una interacción bidireccional entre la producción acuícola y las emisiones de GEI, lo que pone de relieve la urgencia de diseñar marcos normativos que respalden el desarrollo sostenible. En este escenario, la acción coordinada entre los organismos gubernamentales, los actores de la industria y las instituciones académicas es crucial para formular regulaciones que armonicen el progreso económico con la responsabilidad ambiental.

Conclusiones

La contribución de la acuicultura a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ha despertado un creciente interés debido a su relevancia en la agenda de sostenibilidad global. La evidencia científica demuestra que este sector presenta tanto riesgos como oportunidades climáticas. Por un lado, los sistemas acuícolas que dependen en gran medida de insumos y

alimentos balanceados pueden generar elevados niveles de GEI, los cuales llegan a superar las emisiones de ciertas formas de ganadería terrestre. Por otro lado, las prácticas con especies no alimentadas, como las algas marinas y los bivalvos, registran una huella de carbono insignificante, e incluso algunos sistemas integrados exhiben la capacidad de secuestrar carbono. De este modo, la acuicultura abarca un espectro que va desde modelos de producción con una alta intensidad de emisiones hasta prácticas que actúan como sumideros de carbono.

Las principales conclusiones de esta revisión incluyen:

• **Fuentes de emisiones.** En la mayoría de las operaciones de acuicultura alimentada, la producción de alimento constituye la principal fuente de GEI, seguida del consumo energético in situ y las emisiones de CH_4 de los sistemas basados en estanques. Las emisiones también pueden verse significativamente incrementadas por el transporte aéreo de productos. Las transformaciones del uso del suelo, como la deforestación de manglares para el cultivo de camarones, contribuyen a importantes emisiones puntuales de CO_2.

• **Variación de especies.** Las emisiones varían significativamente según la especie. Los organismos no alimentados, como los bivalvos y las algas marinas, tienen las emisiones más bajas, a menudo cercanas a cero o incluso resultando en una eliminación neta de carbono. El cultivo semi-intensivo de peces herbívoros como la carpa y la tilapia también produce emisiones de GEI comparativamente bajas. Por el contrario, la cría intensiva de especies carnívoras (por ejemplo, trucha y salmón) y camarones tiende a resultar en mayores emisiones debido a las sustanciales demandas de alimento y energía. Cabe señalar que ciertos sistemas de acuicultura intensiva se encuentran entre las formas de producción de proteína con mayor intensidad de GEI, lo que subraya que un desempeño bajo en carbono depende estrictamente de las prácticas de manejo y no es una cualidad intrínseca de la acuicultura.

• **Tendencias regionales.** China representa la mayor parte de las emisiones globales de GEI relacionadas con la acuicultura, debido a su gran escala de producción. Otros países asiáticos (como India, Indonesia y Vietnam) también contribuyen significativamente, en particular en relación con las emisiones de CH_4 de los sistemas de estanques y la continua expansión del sector. Si bien los países europeos y Estados Unidos contribuyen menos en términos absolutos, sus emisiones por unidad de producción suelen ser mayores, sobre todo en sistemas con alto consumo energético, como la salmonicultura. Por lo tanto, es fundamental mejorar las prácticas de cultivo a nivel mundial para lograr una mitigación significativa.

• **Enfoques de reducción.** Existe un amplio margen para la reducción de emisiones mediante intervenciones establecidas, como la optimización del uso y la formulación de alimentos, la transición a fuentes de energía renovables, la mejora de la eficiencia de los equipos, la implementación de técnicas de integración de especies (p. ej., acuaponía y acuicultura multitrófica integrada) y la mejora de las prácticas en las explotaciones para limitar las emisiones de CH_4 y N_2O. Los avances tecnológicos tales como sistemas de recirculación acuícola (RAS) energéticamente eficientes, piensos alternativos y los marcos normativos de apoyo serán fundamentales para alcanzar estos objetivos de mitigación.

Esta es una versión resumida, elaborada por el cuerpo editorial de "El Acuicultor", del artículo original "Understanding and mitigating greenhouse gas emissions in aquaculture: a review of emission sources, regional trends and sustainability psthways." Escrito por Hong Yang. Front. Agr. Sci. Eng., 2026, 13(3): 25665 DOI: 10.15302/J-FASE-2025665

ADDIGRAINS®
La Evolución es Nuestra Clave

















Innovación y Nutrición: Una Alianza Estratégica para el Desarrollo Acuícola

SVA y Addigrains se unen para potenciar el rendimiento y la sostenibilidad de la acuicultura venezolana a través de soluciones nutricionales de vanguardia.

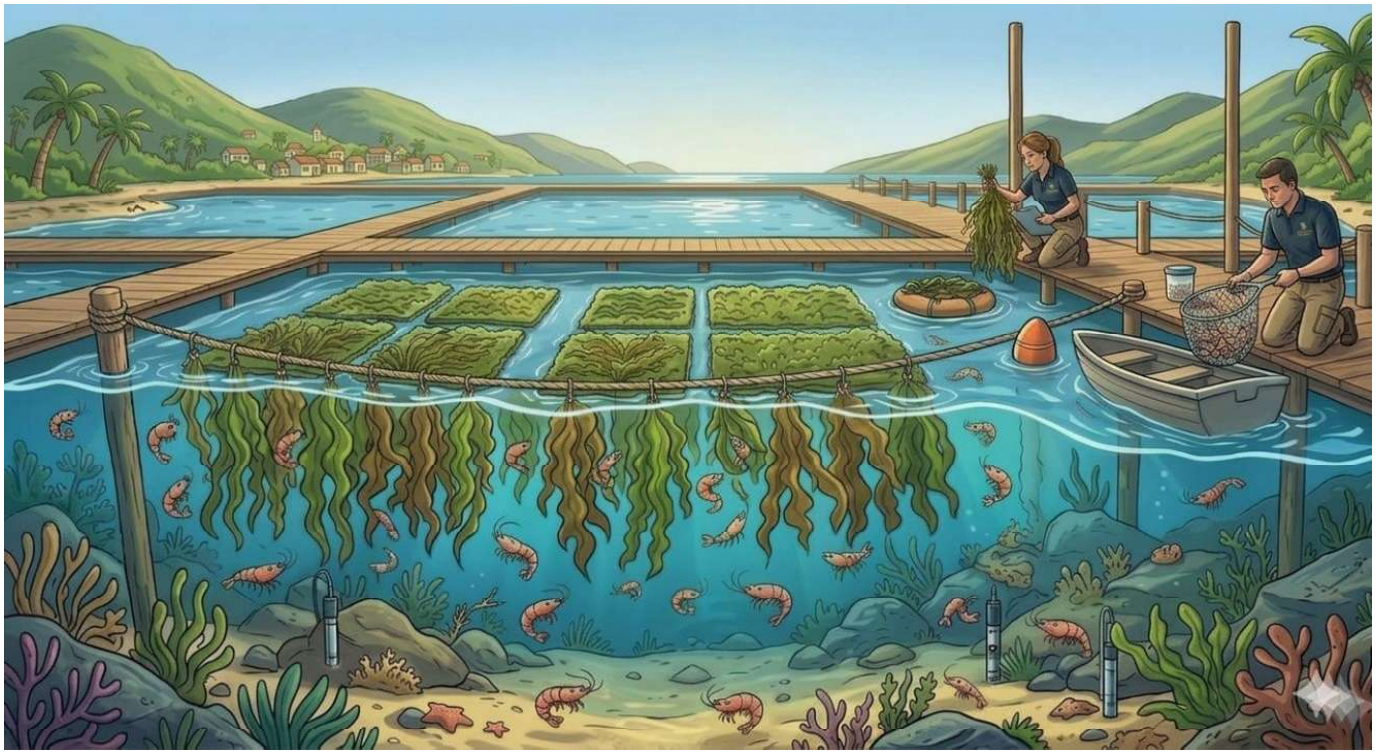


www.addigrains.com.ve
@addigrains

Soluciones en Salud y Nutrición Animal

SISTEMA DE POLICULTIVO DE CAMARONES Y ALGAS MARINAS COMO ENFOQUE SOSTENIBLE DE LA ACUICULTURA

Cuerpo editorial de El Acuicultor



Introducción

La creciente demanda global ha impulsado la producción de camarón mediante diversas prácticas en sistemas acuícolas. Sin embargo, la acumulación de materia orgánica, proveniente del alimento no consumido y las heces, genera residuos que se depositan en el fondo de los estanques. Este enriquecimiento del sedimento incrementa el riesgo de eutrofización, lo que puede desencadenar floraciones algales nocivas, degradar la calidad del agua de los ecosistemas y comprometer la viabilidad de la propia actividad acuícola. Ante esta problemática, los sistemas de policultivo surgen como una alternativa frente al monocultivo, promoviendo la sostenibilidad

mediante la optimización del espacio y el tiempo dentro del entorno acuícola.

El policultivo es un método de producción que consiste en la cría simultánea de dos o más especies en una misma unidad, optimizando así el uso del suelo y el agua. Al utilizar un solo estanque por ciclo, este enfoque incrementa la productividad de la tierra y diversifica los productos obtenidos en la cosecha. Actualmente, el policultivo ha evolucionado hacia la Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA, por sus siglas en inglés), un sistema que replica las interacciones de la cadena trófica natural. En la IMTA se integran organismos de diferentes niveles tróficos, de modo que los residuos metabólicos y el alimento no consumido de una especie son aprovechados como fuente de nutrientes por otra. Este mecanismo permite el reciclaje eficiente de nutrientes y genera biomasa adicional de valor comercial. Dado que la acuicultura contemporánea exige minimizar sus impactos ambientales, la IMTA surge como una opción eficaz para mitigar la contaminación hídrica, optimizar el uso de la columna de agua, maximizar la eficiencia del espacio acuático y aumentar el rendimiento económico a través de la diversificación productiva.

Las macroalgas marinas constituyen un componente idóneo para su integración con el cultivo de camarones, ya que actúan como biofiltros naturales capaces de absorber compuestos nitrogenados, como el amonio, y de estimular el desarrollo de comunidades de zooplancton que sirven de alimento vivo para los crustáceos. Asimismo, estos organismos fotosintéticos asimilan los nutrientes derivados de la degradación de la materia orgánica para promover su propio crecimiento, mitigando así la acumulación de residuos en la columna de agua. Adicionalmente, las algas sintetizan compuestos bioactivos con propiedades antibacterianas, los cuales inhiben la proliferación de patógenos potenciales que podrían comprometer la sanidad de los camarones.

Este artículo tiene como objetivo analizar la implementación del sistema de policultivo de camarón y algas marinas a partir de la evidencia científica publicada, demostrando su impacto directo en la optimización de la calidad del agua y en el rendimiento productivo de los sistemas de cultivo.

Sistema de policultivo

El policultivo constituye un enfoque productivo que integra múltiples especies dentro de una misma unidad, con el propósito de optimizar la eficiencia en el uso de los recursos y maximizar la productividad global. Bajo este modelo, cada organismo desempeña funciones ecológicas diferenciadas que permiten un aprovechamiento complementario y sinérgico de los nutrientes disponibles. De este modo, la selección y composición de las especies empleadas determinan de manera significativa las tasas de crecimiento y el rendimiento biótico del sistema. En el ámbito acuícola, esta metodología representa un avance tecnológico clave para incrementar la eficiencia de conversión del alimento balanceado. Al fundamentar su diseño en los niveles tróficos y los hábitos alimentarios específicos de cada especie, el sistema potencia la ganancia de biomasa y estimula el crecimiento individual, al tiempo que minimiza la competencia interespecífica por los recursos.

El policultivo ha evolucionado hacia la Acuicultura Multitrófica Integrada (IMTA), un enfoque que integra dos o más especies de diferentes niveles tróficos dentro de

una misma unidad de cultivo, permitiendo que los subproductos metabólicos de un organismo sean aprovechados por otro. El fundamento biológico de este sistema radica en la complementariedad de los nichos ecológicos, donde cada especie desempeña un rol funcional diferenciado. Esta segregación de nichos minimiza la competencia interespecífica y promueve interacciones sinérgicas. En el modelo específico de policultivo de camarones y macroalgas marinas, se establece una relación recíproca basada en el flujo y reciclaje de nutrientes. Los camarones, en su rol de organismos heterótrofos, generan residuos compuestos por alimento no consumido, heces y nutrientes inorgánicos disueltos, tales como amoníaco (NH_3), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-). Mientras que en los sistemas de monocultivo estos efluentes degradan la calidad del agua, en el sistema multitrófico son asimilados eficientemente por las macroalgas, las cuales actúan como componentes autótrofos que transforman dichos residuos en biomasa.

Las algas marinas, como *Gracilaria* sp., son capaces de absorber estos nutrientes inorgánicos para la fotosíntesis y el crecimiento, funcionando, así como un biofiltro natural y ayudando a reducir las concentraciones de residuos en el agua. Esta interacción crea un sistema más eficiente y estable, ya que los desechos de los camarones no se acumulan, sino que son reutilizados por las algas. Así, la relación entre el camarón y la macroalga en los sistemas de policultivo es mutuamente complementaria. Los camarones proporcionan nutrientes para las algas, mientras que las algas contribuyen a mantener una calidad ambiental que favorece el crecimiento de los crustaceos. El mecanismo para implementar el sistema de policultivo de camarones y algas marinas se muestra en la **Figura 1**.

Las macroalgas marinas utilizan su talo para absorber diversos nutrientes inorgánicos disueltos, tales como el amonio, el nitrato y el nitrito. Estos compuestos son asimilados para satisfacer sus requerimientos metabólicos, lo que otorga a las macroalgas una alta

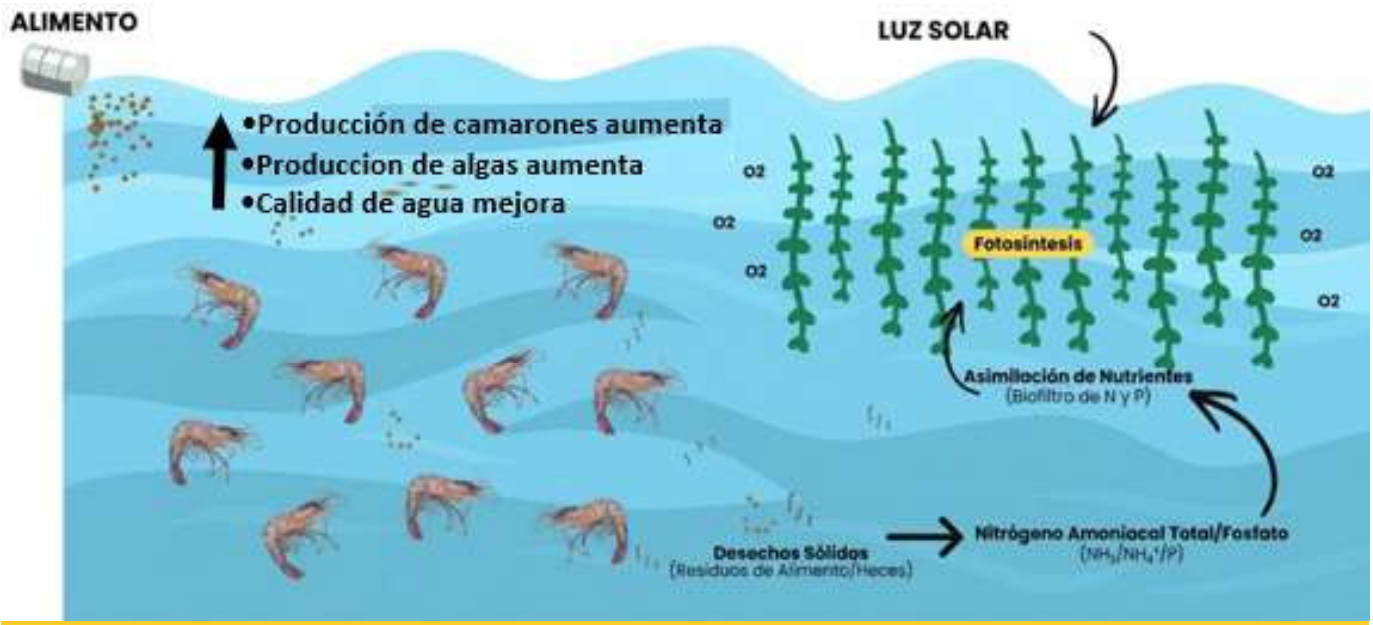


Figura 1. Representación esquemática de un sistema de policultivo de camarones y algas marinas.

capacidad como biofiltros naturales. Por ejemplo, el género *Gracilaria* exhibe una tasa de absorción de nitrógeno de aproximadamente 0,4 g/m^2/día. Esta función depurativa es crítica, ya que el deterioro de la calidad del agua provocado por concentraciones elevadas de nitrógeno amoniacal total (TAN) favorece la proliferación de bacterias patógenas, como las del género *Vibrio*, en los estanques de cultivo. En consecuencia, la integración de *Gracilaria* spp. en sistemas de policultivo contribuye a la supresión de estas poblaciones bacterianas nocivas. Adicionalmente, se ha documentado que este género posee compuestos con actividad antibacteriana que confieren protección inmunológica y sanitaria a los camarones peneidos.

Por su parte, los sistemas de policultivo basados en la Acuicultura Multitrófica Integrada destacan por su notable flexibilidad operativa, lo que permite su implementación tanto en ambientes límnicos como marinos mediante diversas asociaciones biológicas, tales como camarón/mejillón, pez/camarón/mejillón o camarón/alga (**Figuras 2 y 3**).

La implementación de sistemas de policultivo de camarón con macroalgas marinas continúa evolucionando gracias al desarrollo de diversas investigaciones. El éxito operativo de estos sistemas está condicionado por múltiples factores, entre los que destacan la densidad de siembra de los crustáceos y la biomasa algal introducida. Los valores óptimos para estos parámetros varían significativamente en la literatura científica. Por ejemplo, se ha determinado que una carga excesiva de macroalgas puede desencadenar competencia por la luz, lo que reduce la tasa de crecimiento específica de las algas por debajo del 2 % diario. Asimismo, un incremento desmedido de la materia orgánica derivada de las heces y desechos del camarón puede comprometer la eficiencia de biofiltración de *Gracilaria* spp.

Desde una perspectiva técnica, las densidades de siembra y la biomasa algal reportadas presentan una amplia variabilidad entre estudios. No obstante, se ha demostrado que el sistema mantiene la calidad del agua incluso bajo condiciones de alta carga biológica, utilizando densidades de camarón de hasta 500 individuos/m^3 combinadas con una biomasa de algas de 2 kg/m^3. Por otra parte, investigaciones alternativas sugieren que una concentración de macroalgas de 3,1 g/L resulta óptima para maximizar el rendimiento del policultivo. Más allá de estos parámetros de manejo,



Figura 2. Sistema de Policultivo de camarones y algas.

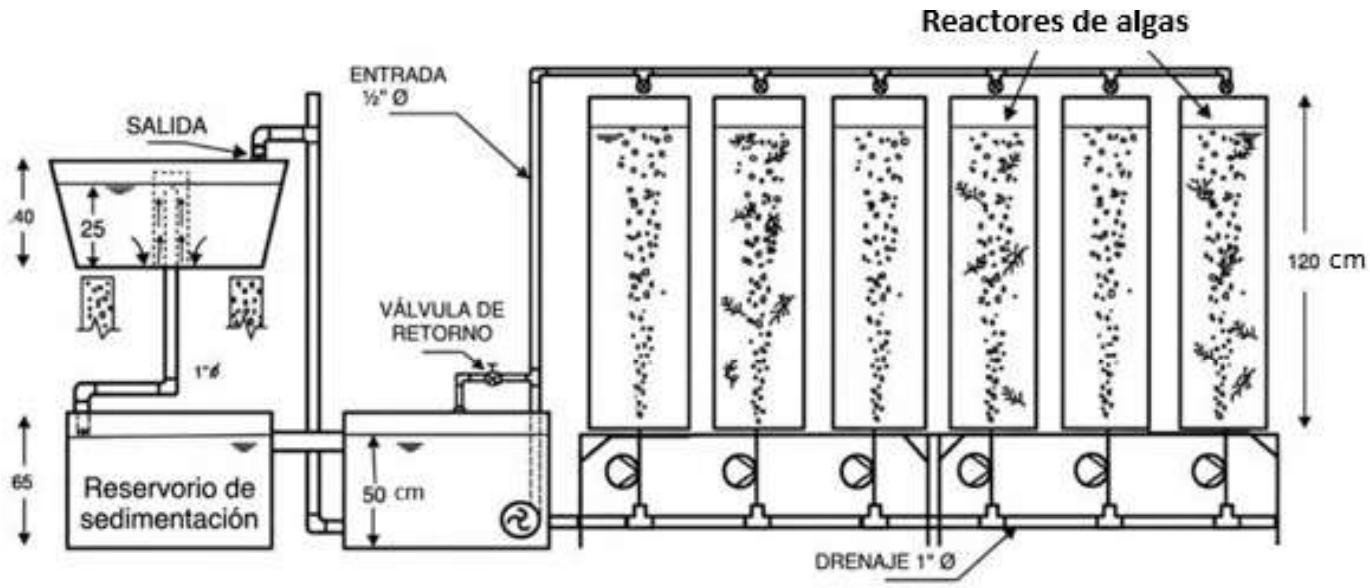


Figura 3. Diseño de IMTA donde las especies se desarrollan en estructuras físicamente independientes, pero manteniendo un flujo hídrico común y completamente integrado.

variables ambientales como la salinidad, la temperatura y la radiación solar juegan un rol crítico. Las macroalgas requieren una intensidad lumínica adecuada para realizar la fotosíntesis, por lo que una turbidez elevada en la columna de agua inhibe severamente su desarrollo. En síntesis, la viabilidad de este modelo acuícola depende estrictamente de alcanzar un equilibrio dinámico entre la tasa de generación de residuos nitrogenados por parte de los camarones y la capacidad de asimilación de las macroalgas.

El impacto de los sistemas de policultivo de camarón y algas marinas en la calidad del agua

Los sistemas de policultivo basados en la integración de camarones y macroalgas marinas desempeñan un rol fundamental en la biorremediación de efluentes, al asimilar activamente los compuestos nitrogenados derivados del alimento no consumido y del catabolismo de los crustáceos. Especies como *Gracilaria verrucosa* poseen la capacidad de absorber eficientemente el nitrógeno amoniacal total (TAN) y el nitrito (NO_2^-), manteniendo las concentraciones de estos metabolitos potencialmente tóxicos por debajo de los umbrales críticos de tolerancia para los camarones. Al respecto, se ha evidenciado que la adición de algas marinas a una densidad de 2 kg/m^3 estabiliza de manera significativa los parámetros de calidad del agua, incluso en escenarios de alta densidad de siembra que alcanzan los 300 individuos/m^3. Asimismo, la incorporación de la macroalga *Caulerpa lentillifera* en sistemas de cultivo intensivo ha demostrado una alta eficiencia en la remoción de amonio y ortofosfatos.

La presencia de estas macroalgas en las unidades de producción ejerce un efecto amortiguador sobre la dinámica fisicoquímica del sistema hídrico, regulando especialmente el pH y el oxígeno disuelto. Mediante la actividad fotosintética diurna,

las macroalgas incrementan los niveles de oxígeno disuelto en la columna de agua, un factor limitante y crucial para el metabolismo, la respiración y el crecimiento óptimo de los camarones. Por otra parte, el establecimiento de una disposición física con espaciamientos óptimos de siembra (p. ej., 45 cm) favorece la hidrodinámica del sistema y la proliferación de comunidades planctónicas, lo que fortalece el equilibrio ecológico del estanque. Adicionalmente, el modelo de policultivo mitiga las fluctuaciones drásticas en las variables de calidad del agua inducidas por eventos climáticos extremos, proporcionando un entorno acuícola ambientalmente controlado y resiliente.

La integración de diversas especies bajo el modelo de Acuicultura Multitrófica Integrada, tales como el camarón, el chano (*Chanos chanos*) y las macroalgas marinas, genera sinergias biológicas que propician un aprovechamiento de nutrientes significativamente más eficiente en comparación con los sistemas de monocultivo convencionales. En estos diseños multitróficos, peces como el chano y la tilapia roja (*Oreochromis* spp.) actúan como organismos detritívoros y limpiadores naturales que consumen la materia orgánica particulada y los residuos bentónicos, reduciendo de manera drástica la carga de efluentes en la columna de agua. Al respecto, se ha demostrado que una reducción de la tasa de alimentación artificial de hasta un 75 % en los sistemas IMTA no compromete la calidad del agua; por el contrario, el equilibrio del ecosistema artificial provee fuentes alternativas de nutrientes naturales y optimiza la eficiencia de asimilación del sistema. Esto evidencia que el policultivo mitiga activamente el riesgo de eutrofización y la sedimentación de materia orgánica en el fondo de los estanques.

Desde una perspectiva ecológica, estos sistemas integrados confieren una protección ambiental sostenible, particularmente en zonas costeras vulnerables a perturbaciones antropogénicas o climáticas. Las macroalgas, en su rol de biofiltros naturales, incrementan la capacidad de carga de las unidades de producción, un factor crítico en regiones propensas a la erosión o a inundaciones por dinámicas de marea. La estabilidad fisicoquímica del agua, lograda a través de esta biofiltración, se correlaciona directamente con un incremento en las tasas de supervivencia de los camarones, las cuales superan el 80 %. En consecuencia, el enfoque del policultivo no solo optimiza la calidad del agua a escala local, sino que también fortalece la resiliencia y la sostenibilidad de los ecosistemas costeros circundantes.

El impacto de los sistemas de policultivo de camarón y algas marinas en la productividad

La implementación de sistemas de policultivo optimiza significativamente el rendimiento productivo y el crecimiento de los camarones al proporcionar una mayor estabilidad ambiental en comparación con los esquemas de monocultivo convencionales. Se ha demostrado que la incorporación de macroalgas marinas como componentes de biofiltración natural incrementa la tasa específica de crecimiento (SGR, por sus siglas en inglés) y el peso absoluto del camarón blanco (*Penaeus vannamei*). Estos hallazgos se sustentan en evidencias que confirman que la integración algal incrementa la biomasa total de los crustáceos en comparación con aquellos

sistemas exentos de estos organismos fotosintéticos. Este estímulo en el crecimiento se atribuye a que las macroalgas mantienen un suministro estable de oxígeno disuelto en la columna de agua, un factor limitante y crítico para el metabolismo energético y los procesos fisiológicos de ecdisis (muda) en los camarones.

Además de potenciar los índices de crecimiento, los modelos de policultivo ejercen un impacto positivo y estadísticamente significativo en la tasa de supervivencia. Al respecto, la integración del género *Gracilaria* en las unidades de cultivo incrementó la supervivencia de *P. vannamei* desde un 63 % hasta un 83 %. Tendencias similares se han reportado con el uso de *Caulerpa lentillifera*, donde una densidad óptima de esta macroalga permitió alcanzar una supervivencia del 86.7 %. Este incremento en la viabilidad biológica responde a la capacidad de las algas para mitigar las concentraciones fitotóxicas de amonio y nitritos. Adicionalmente, las macroalgas sintetizan metabolitos secundarios bioactivos, tales como alcaloides, saponinas, flavonoides, esteroides y compuestos fenólicos que comprometen la viabilidad bacteriana. Específicamente, se ha documentado que los flavonoides poseen la capacidad de permear la membrana celular de bacterias Gram-negativas, como V*ibrio harveyi*, disrumpiendo sus vías metabólicas y actuando como un agente de control sanitario natural.

La eficiencia nutricional, evaluada mediante la tasa de conversión alimenticia (TCA), también exhibe una mejora significativa bajo el modelo de policultivo. Los camarones co-cultivados con macroalgas marinas muestran una TCA sustancialmente más eficiente, lo cual se atribuye a la disponibilidad de fuentes nutricionales alternativas, tales como el biofilm microbiano y los detritos orgánicos adheridos al talo de las algas. De hecho, se ha constatado que una restricción de hasta el 25 % en las raciones de alimento balanceado comercial en sistemas IMTA no compromete de manera significativa el rendimiento del crecimiento de los camarones, dado que el equilibrio del ecosistema provee nutrientes complementarios de alto valor biológico. En consecuencia, la obtención de valores de TCA más bajos mitiga los costos operativos asociados a la alimentación, incrementando con ello la rentabilidad financiera y la eficiencia económica de las unidades de producción.

En términos generales, la productividad de los sistemas de policultivo supera ampliamente a la de los monocultivos convencionales debido a la diversificación biológica de las cosechas. Este enfoque integrado faculta a los productores para generar ingresos simultáneos a partir de camarones, peces y macroalgas marinas dentro de un mismo ciclo productivo. Por lo tanto, el policultivo no solo incrementa los volúmenes totales de biomasa comercializable, sino que también garantiza la sostenibilidad económica y ecológica de las comunidades acuícolas costeras. No obstante, el éxito de estos rendimientos está estrictamente supeditado a factores críticos como la densidad de siembra algal, la penetración de la radiación solar y las variables fisicoquímicas del agua. En escenarios donde las macroalgas no alcanzan un desarrollo vegetativo óptimo, las ventajas sistémicas disminuyen sustancialmente y dejan de proveer retornos financieros viables. Por el contrario, bajo condiciones bióticas y abióticas idóneas, las macroalgas maximizan la eficiencia global del sistema al actuar de forma simultánea como agentes de biorremediación hídrica y como un recurso alimentario complementario.

Conclusiones

En síntesis, el sistema de policultivo que integra camarones y macroalgas marinas constituye una innovación acuícola que amalgama la eficiencia productiva con la conservación ambiental bajo el principio de un ecosistema equilibrado. La evidencia científica demuestra que las macroalgas operan como agentes de biorremediación natural al asimilar activamente los excedentes de nutrientes derivados del alimento no consumido y de los subproductos metabólicos de los crustáceos. Este mecanismo mitiga de forma drástica el deterioro de la calidad del agua y minimiza los riesgos sanitarios asociados a la acumulación de amonio. Más allá de optimizar el entorno ecológico, esta configuración multitrófica genera un doble beneficio socioeconómico para los productores mediante la diversificación biológica de las cosechas y la optimización de los índices de conversión alimenticia. Por consiguiente, la implementación del policultivo no solo incrementa de manera significativa las tasas de supervivencia y el crecimiento en los camarones, sino que también consolida un modelo de producción resiliente frente a los desafíos impuestos por el cambio climático y la degradación ambiental en los ecosistemas costeros.

Esta es una versión resumida, elaborada por el cuerpo editorial de "El Acuicultor", del artículo original "Shrimp and Seaweed Polyculture System as A Sustainable Aquaculture Approach: A Literature Review" escrito por Andriani, Y., Pratiwi, D.Y. y Narda, N.D. 2026. World Scientific News. 147. https://doi.org/10.65770/OOGS4240



EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO PRODUCTIVO DE *KAPPAPHYCUS ALVAREZII*: EFICIENCIA TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO POR LONG LINE Y BALSA FLOTANTE

Cuerpo editorial de El Acuicultor



Introducción

Las algas marinas constituyen una materia prima ("commodity") de elevado valor económico y estratégico para las naciones tropicales y subtropicales, con un arraigo especialmente significativo en el sudeste asiático. Dentro de este sector, la especie *Kappaphycus alvarezii* se ha consolidado como un componente clave para la acuicultura global debido a su alto rendimiento en la producción de carragenina, un hidrocoloide que representa entre el 8 y el 25 % de su peso seco. Esta ventaja bioquímica le otorga a la macroalga una posición privilegiada y una alta competitividad en los mercados internacionales.

Su cultivo destaca como una actividad económica altamente eficiente y sostenible, ya que prescinde de insumos externos

como alimentos o fertilizantes. Asimismo, al no requerir personal técnico altamente especializado, se facilita su adopción en diversos contextos sociodemográficos.

Desde la perspectiva comercial, esta especie mantiene un valor de mercado estable gracias a su alta demanda en múltiples industrias globales, principalmente la de los hidrocoloides. A nivel social, la práctica ha impulsado la economía de las zonas costeras y ha optimizado los ingresos locales, consolidándose como una alternativa viable frente a la pesca tradicional. El impacto de este sector se refleja claramente en países como Indonesia, donde para el año 2023 se registraron más de 20.000 productores dedicados activamente a la maricultura de algas en diversas regiones del archipiélago.

El éxito en la acuicultura de *Kappaphycus alvarezii* está condicionado por la selección de sistemas de cultivo que se adecuen a las condiciones oceanográficas locales, la geomorfología del sitio y la capacidad financiera de los productores.

Entre las técnicas más difundidas destaca el método de "long line" flotante, un sistema tradicional ampliamente adoptado por pequeños y medianos acuicultores debido a su simplicidad operativa y baja inversión de capital. Este método consiste en el despliegue horizontal de líneas superficiales donde las plántulas se fijan a intervalos regulares de 20 a 30 centímetros (**Figura 1a**). Por el contrario, los sistemas de balsas flotantes emplean estructuras más complejas que optimizan el manejo del cultivo y maximizan la productividad por unidad de área (**Figura 1b**). Asimismo, la verticultura surge como una alternativa innovadora que aprovecha eficientemente la columna de agua hasta profundidades de 3 a 5 metros, lo que incrementa significativamente el rendimiento de la biomasa en comparación con los métodos estrictamente superficiales.

Desde una perspectiva fisiológica, el desarrollo de *K. alvarezii* está regulado por una interacción compleja de factores físicos, químicos y biológicos. El mantenimiento de parámetros óptimos de calidad del agua, como un rango térmico de 20 a 30 °C, una salinidad de 28 a 34 ppt, un pH de 7,0 a 8,5 y una penetración de luz de 1,5 a 3,0 metros, resulta crítico para garantizar la eficiencia fotosintética y la homeostasis metabólica de la macroalga. Adicionalmente, el régimen de corrientes desempeña un rol fundamental al favorecer la renovación y disponibilidad de nutrientes esenciales en la interfaz agua-planta. Dado que estas variables ambientales exhiben una marcada variabilidad tanto espacial como temporal, las tasas de crecimiento de la especie suelen presentar respuestas heterogéneas entre distintas zonas y ciclos de cultivo.

A pesar del elevado potencial productivo de la ficocultura, la actividad enfrenta desafíos críticos asociados con la inestabilidad de los rendimientos y la heterogeneidad en la calidad del producto final. Se ha demostrado que la selección del sistema de cultivo influye directamente en las tasas específicas de crecimiento y en la vulnerabilidad biótica. Por ejemplo, las estructuras de balsa flotante registran tasas de crecimiento diario (DGR) de hasta un 3,69 % y una baja incidencia de daños por herbivoría. En contraste, el método de "long line" flotante exhibe una mayor fluctuación en el crecimiento, con tasas que oscilan entre el 2,43 % y el 4,85 % diario, pero con una susceptibilidad significativamente más alta al pastoreo. Esta variabilidad evidencia la inexistencia de un método óptimo universal, lo que sugiere que la viabilidad y eficiencia de cada sistema dependen de las condiciones micro ambientales y de la ubicación geográfica del emplazamiento.

Con el propósito de abordar estas discrepancias, este estudio se propuso sintetizar la evidencia científica publicada entre 2017 y 2026 para comparar el desempeño de ambos métodos de cultivo, evaluar la influencia de los factores macro ambientales y determinar el impacto de la calidad de las semillas (plántulas). Finalmente, este trabajo busca proveer recomendaciones fundamentadas en evidencia empírica que contribuyan al desarrollo sostenible y a la optimización técnica del cultivo de *Kappaphycus alvarezii*.

Método de cultivo de "long line"

El método de "long line" flotante constituye la técnica más difundida para la producción de *Kappaphycus alvarezii*. Este sistema consiste en una línea principal suspendida horizontalmente cerca de la superficie marina mediante flotadores, la cual se asegura al sustrato con anclajes en ambos extremos. Sobre esta estructura, las plántulas se fijan a intervalos regulares de 20 a 30 centímetros (**Figura 1a**). La preferencia por esta metodología radica en su simplicidad operativa, bajos costos de capital y facilidad de mantenimiento; atributos que la convierten en una opción altamente accesible para pequeños y medianos acuicultores. No obstante, su configuración abierta expone el cultivo a una intensa presión por herbivoría, así como a daños mecánicos causados por el oleaje y las corrientes, factores que pueden comprometer drásticamente la productividad. En consecuencia, las tasas específicas de crecimiento diario exhiben una amplia variabilidad, oscilando entre el 2,43 y el 8,4 % en función de las condiciones micro ambientales y de la ubicación geográfica del emplazamiento.

Método de cultivo en balsas flotantes

El sistema de balsa flotante emplea una estructura modular en forma de marco, construida con caña de bambú o polímeros sintéticos, que provee una estabilidad estructural superior en comparación con el método de "long line" flotante. Las modificaciones de este diseño abarcan el uso de jaulas flotantes, redes tubulares y configuraciones de verticultura, las cuales actúan como barreras físicas que mitigan eficazmente la herbivoría y el estrés hidrodinámico causado por el oleaje (**Figura 1b**). En consecuencia, aunque este método demanda una mayor inversión inicial de capital y costos operativos más elevados, genera un incremento significativo en la biomasa total acumulada por ciclo productivo. La literatura reporta tasas específicas de crecimiento diario de hasta el 6,9 % bajo este sistema. Asimismo, en términos de rendimiento absoluto, las estructuras confinadas como las jaulas flotantes alcanzan una producción de 38,8 kg en un ciclo de 40 días, superando notablemente los 22,5 kg obtenidos mediante el sistema de "long line" bajo condiciones iniciales estandarizadas.

Factores ambientales que afectan al crecimiento de algas marinas

La productividad de *Kappaphycus alvarezii* está regulada por una compleja interacción de variables oceanográficas, entre las que destacan la temperatura del agua, la salinidad, el régimen de corrientes, la intensidad lumínica y la profundidad de siembra. El rango térmico óptimo para el desarrollo de la macroalga se sitúa entre los 27 y 30 °C,

mientras que la salinidad ideal oscila entre 28 y 34 ppt. Concentraciones salinas superiores a las 36,8 ppt provocan un estrés osmótico que reduce significativamente el rendimiento de la biomasa. Por su parte, la velocidad de la corriente ejerce un efecto dual: flujos moderados (entre 20 y 40 cm/s) optimizan la tasa de renovación y la absorción de nutrientes esenciales, mientras que velocidades inferiores a 5 cm/s propician la proliferación de epífitas y valores superiores a 40 cm/s inducen daños mecánicos y desprendimientos en los talos. Asimismo, la profundidad de cultivo resulta crítica debido al gradiente de atenuación lumínica, observándose un descenso en la eficiencia fotosintética cuando las plantas se ubican a profundidades menores a 20 cm (por fotoinhibición o estrés térmico) o mayores a 50 cm (por limitación de luz).

Más allá de los factores ambientales, la calidad del material vegetal inicial constituye un factor determinante para el éxito productivo, independientemente del sistema de cultivo implementado. Las plántulas micropropagadas mediante técnicas de cultivo de tejidos exhiben tasas de crecimiento absoluto significativamente superiores en comparación con las convencionales de propagación vegetativa; una ventaja atribuida a su condición axénica (libre de patógenos) y a una mayor actividad mitótica en sus regiones meristemáticas. De igual modo, la selección genotípica y el uso de cepas mejoradas influyen directamente en la robustez y el rendimiento final de la biomasa.

En síntesis, la productividad global de *K. alvarezii* está definida por la sinergia entre el método de cultivo, el entorno hidrológico y la calidad de la semilla. No obstante, la literatura científica actual carece de un análisis integral que articule estas tres dimensiones de manera sistemática. Por consiguiente, la presente revisión tiene como propósito consolidar una base de evidencia multidimensional que sirva como guía técnica en la toma de decisiones para los acuicultores y los gestores del sector acuícola.

Métodos de cultivo de algas

Los dos principales métodos de cultivo comparados en este estudio se ilustran en la **Figura 1**.

Los sistemas de línea larga flotante y de balsa flotante constituyen las dos metodologías más extendidas en la producción acuícola de *Kappaphycus alvarezii*, diferenciándose notablemente en sus configuraciones técnicas y dinámicas operativas. El método de línea larga se fundamenta en el despliegue horizontal de una línea principal sobre la superficie marina, de la cual se suspenden filamentos secundarios con las plántulas adosadas. Este diseño destaca por su simplicidad estructural y facilidad de implementación, atributos que explican su alta adopción entre los productores locales. En contraposición, el sistema de balsa flotante emplea marcos modulares construidos con caña de bambú o madera que se mantienen fijos mediante sistemas de anclaje, lo que proporciona una plataforma de mayor estabilidad física en la interfaz agua-aire.

Las divergencias fundamentales entre ambas técnicas radican en el grado de estabilidad estructural, la hidrodinámica del flujo hídrico y la eficiencia en la captación de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), variables que determinan el desarrollo fisiológico de la macroalga. Las balsas flotantes proveen una resistencia superior ante el estrés mecánico derivado del oleaje. No obstante, las líneas largas optimizan la circulación del agua y la penetración lumínica al carecer de barreras físicas superficiales que obstruyan el paso

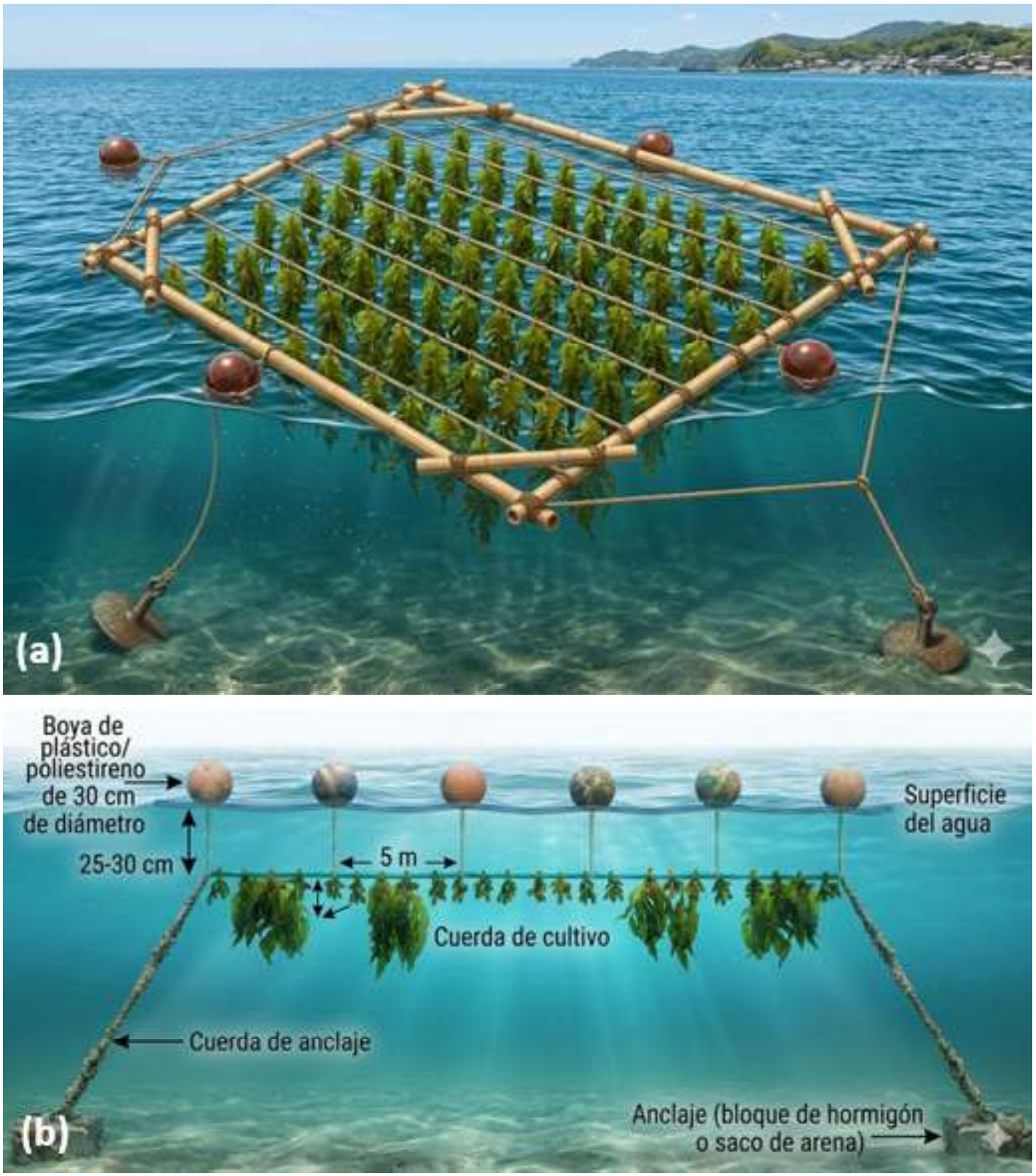


Figura 1. Cultivo de algas marinas. (a) Método de balsa flotante. (b) Método de "long line". Fuente: Departamento de Acuicultura de SEAFDEC.

de la luz. En consecuencia, esta dinámica lumínica y nutricional permite que el método de "long line" registre tasas de crecimiento específico individual más elevadas, mientras que el sistema de balsa flotante demuestra un rendimiento superior en términos de biomasa total por unidad de superficie, debido a su capacidad para albergar una mayor densidad de siembra.

Productividad en ambos sistemas

La evaluación del éxito en el cultivo de *Kappaphycus alvarezii* se fundamenta en la cuantificación de su desarrollo biomasal a través de indicadores cinéticos clave, tales como la tasa de crecimiento diario (DGR, por sus siglas en inglés), la tasa de crecimiento específica (SGR, por sus siglas en inglés) y la tasa de crecimiento absoluto (AGR, por sus siglas en inglés). Estas métricas están reguladas de forma sinérgica tanto por factores intrínsecos, especie, cepa, edad ontogénica del talo y origen fitosanitario de las plántulas, como por variables extrínsecas, representadas por la temperatura, la salinidad, el flujo hidrodinámico, la radiación solar, la disponibilidad de nutrientes y la tipología del sistema de cultivo implementado.

La literatura científica reporta una amplia fluctuación en los valores de DGR y SGR, con registros que oscilan entre el 0,02 y el 8,4 % diario, aunque el rango óptimo documentado por la mayoría de las investigaciones se sitúa entre el 3 y el 6 % por día. De igual manera, el rendimiento de la biomasa total exhibe una marcada variabilidad espacio-temporal y tecnológica, con productividades que van desde los 495–848 g/m hasta máximos de 2.819 g/m.

Al contrastar los sistemas de producción, se evidencia que los métodos acuícolas que incorporan estructuras de protección física para el talo optimizan los índices de crecimiento y acumulación de biomasa en comparación con las configuraciones abiertas de "long line". Los sistemas de balsa flotante modificados, particularmente las jaulas flotantes, demuestran un desempeño productivo superior. Por ejemplo, en un ciclo experimental de 40 días a partir de una carga inicial de 5 kg, el método de "long line" generó una biomasa final de solo 22,5 kg (SGR de 2,43 % diario), mientras que el confinamiento en jaulas flotantes permitió alcanzar los 38,8 kg (SGR de 3,69 % diario).

No obstante, el método convencional de "long line" es capaz de ofrecer rendimientos óptimos bajo escenarios ambientales favorables, logrando registrar un AGR de 451,43 g en un periodo de 45 días al emplear plántulas obtenidas mediante cultivo de tejidos (micropropagación). A pesar de este potencial, su eficiencia decrece drásticamente en entornos subóptimos, donde los regímenes de corrientes extremas, ya sea por exceso o por déficit, limitan la fotosíntesis y el intercambio de nutrientes, lo que demuestra que la viabilidad de esta técnica depende críticamente de la calidad oceanográfica del sitio de emplazamiento.

Factores en el Cultivo de Algas

La variabilidad en el rendimiento del cultivo de macroalgas está supeditada a la interacción sinérgica de tres pilares fundamentales: las condiciones ambientales, la configuración de los sistemas de cultivo y la calidad fitosanitaria de las plántulas.

En primer lugar, los factores ambientales, como la temperatura, la salinidad, la velocidad de la corriente, la intensidad lumínica, la profundidad y la estacionalidad, regulan de forma directa la eficiencia fotosintética y la cinética de absorción de nutrientes. La profundidad, por ejemplo, condiciona la penetración de la radiación solar y la estabilidad hidrodinámica. Se ha documentado que a una profundidad de 1,5 metros se alcanza una tasa de crecimiento diario del 3,0 %, la cual decrece hasta

el 1,5 % cuando el cultivo se posiciona a 4 metros. Asimismo, la dinámica estacional ejerce una marcada influencia: durante el periodo de precipitaciones, la mayor disponibilidad de nutrientes y el descenso térmico favorecen tasas de crecimiento de hasta un 4,0 % diario, en contraste con el 3,2 % registrado durante la temporada de sequía.

Respecto a las propiedades fisicoquímicas del agua, éstas exhiben fluctuaciones geográficas significativas. Aunque los rangos térmicos pueden oscilar entre los 26 y 35 °C, el intervalo óptimo se sitúa entre los 27 y 30 °C, lográndose tasas específicas de crecimiento del 3,69 % diario bajo condiciones moderadas de 25 a 27 °C. De igual manera, el mantenimiento de una salinidad de entre 28 y 34 ppt resulta crítico, al igual que un flujo hidrodinámico de 20 a 40 cm/s; velocidades que exceden este umbral inducen estrés mecánico y desprendimiento de los talos, mermando la productividad global.

En segundo lugar, los métodos de cultivo y sus variables técnicas operativas, como la densidad de siembra y el distanciamiento, determinan el acceso de la biomasa a los recursos disponibles. La implementación de barreras físicas contra la herbivoría optimiza significativamente los índices de supervivencia, puesto que las configuraciones abiertas de "long line" flotante pueden registrar pérdidas por pastoreo de hasta el 40 %. Por su parte, el espaciamiento regula la competencia intraespecífica por luz y nutrientes: un distanciamiento de 45 centímetros favorece un crecimiento absoluto de 165 g por talo, superando los 145 g obtenidos bajo una densidad mayor con distancias de 15 centímetros. Además, la profundidad óptima varía según la tecnología empleada; el sistema de "long line" maximiza su desarrollo a los 20 centímetros de la superficie, mientras que las estructuras de balsa flotante alcanzan su rendimiento óptimo a una profundidad de 75 centímetros.

Finalmente, la calidad del material vegetal inicial es el principal determinante del vigor y la productividad en las fases tempranas del ciclo. Las plántulas micropropagadas mediante cultivo de tejidos demuestran un desempeño biológico marcadamente superior al de los propágulos convencionales. En términos de rendimiento tecnológico, el sistema de "long line" flotante es capaz de registrar tasas de crecimiento diario individuales más elevadas (hasta un 6,97 %) frente al sistema de balsa flotante (4,38 %). No obstante, este último demuestra una eficiencia volumétrica superior, lo que se traduce en una mayor acumulación de biomasa total con rendimientos de hasta 1.900 kg por ciclo productivo, en comparación con los 202 kg obtenidos mediante líneas largas.

En conclusión, el éxito y la sostenibilidad de la ficocultura dependen de una matriz multidimensional donde convergen el entorno oceanográfico, el diseño de ingeniería acuícola y la calidad genética de la semilla. Por consiguiente, la optimización de los rendimientos exige que la selección y el manejo de los sistemas de cultivo se adapten a las especificidades hidrológicas locales, contemplando criterios de estacionalidad, hidrodinamismo y zonificación vertical.

Discusión

La productividad en la acuicultura de *Kappaphycus alvarezii* está determinada por una compleja interacción sinérgica entre las condiciones oceanográficas, la ingeniería del sistema de cultivo y la calidad fitosanitaria de las plántulas. Las evidencias demuestran que los sistemas acuícolas que incorporan barreras de protección física contra la acción del oleaje y el pastoreo de peces herbívoros, como las jaulas flotantes, superan

consistentemente a las configuraciones tradicionales de "long line" flotante en términos de acumulación de biomasa total y tasas de supervivencia, como consecuencia de una reducción drástica del estrés mecánico y del daño tisular en los talos.

Por su parte, el método de línea larga exhibe una tendencia a registrar tasas de crecimiento específico individual más elevadas únicamente bajo escenarios ambientales óptimos; su estructura abierta favorece el flujo hidrodinámico continuo y una máxima captación de la radiación fotosintéticamente activa. No obstante, estas ventajas competitivas se diluyen significativamente ante disturbios meteorológicos o fluctuaciones ambientales subóptimas, lo que consolida a esta técnica como una alternativa altamente dependiente de la zonificación del sitio y descarta su viabilidad como metodología de aplicación universal.

Dentro de las variables hidrológicas, la profundidad de siembra y la disponibilidad lumínica actúan como moduladores críticos del desarrollo fisiológico, localizándose los mayores incrementos de biomasa en el estrato superficial hasta los 50 centímetros de la columna de agua. Por debajo de los 4 metros, el coeficiente de atenuación de la luz limita severamente la eficiencia fotosintética y detiene el crecimiento vegetativo. Asimismo, la velocidad de la corriente ejerce un efecto bimodal, donde los flujos moderados de 20 a 40 cm/s constituyen el rango óptimo para maximizar las tasas de renovación y la absorción de nutrientes en la interfaz agua-planta.

A nivel de material biológico, la calidad intrínseca del propágulo inicial representa un factor decisivo para el éxito del ciclo productivo. Las plántulas micropropagadas mediante técnicas de cultivo de tejidos demuestran un crecimiento absoluto significativamente superior en comparación con los ecotipos locales; una ventaja fisiológica atribuida a su condición axénica (libre de patógenos) y a la alta actividad mitótica de sus regiones meristemáticas.

En síntesis, la evidencia científica recopilada sugiere que la optimización de la ficocultura de *K. alvarezii* exige un enfoque holístico e integrador. La selección del sistema técnico, la evaluación de la idoneidad del emplazamiento oceanográfico y la procedencia genética de la semilla no deben gestionarse de manera aislada, sino articularse conjuntamente como variables codependientes para garantizar la sostenibilidad y el rendimiento económico del sector.

Conclusiones y recomendaciones

Los acuicultores deben seleccionar los métodos de cultivo basándose en las condiciones ambientales locales. En áreas protegidas, con baja acción del oleaje y escasa presencia de herbívoros, el método de línea larga es altamente rentable y favorece un rápido crecimiento individual. En áreas costeras expuestas a fuertes corrientes o a una alta presión de plagas, se recomiendan los sistemas de balsa flotante con redes de protección; a pesar de su mayor costo, estas estructuras producen más biomasa total y reducen la pérdida de talos. Independientemente del método, se deben utilizar plántulas cultivadas in vitro provenientes de cepas de alto crecimiento, así como evitar sitios con corrientes extremas (< 5 cm/s o > 40 cm/s) o temperaturas superiores a los 31 °C.

Los resultados de las investigaciones demuestran que ninguno de los métodos de cultivo evaluados posee una superioridad universal. El éxito biológico y comercial

de la ficocultura está supeditado a una estrecha interdependencia entre los factores oceanográficos, la ingeniería del diseño acuícola y la calidad fisiológica del material vegetal inicial. En términos de tasa de crecimiento diario, el sistema tradicional de "long line" flotante exhibe un rendimiento óptimo, con incrementos individuales más elevados bajo escenarios de alta renovación hídrica, buena penetración lumínica y baja presión por herbivoría. Por el contrario, las modificaciones del sistema de balsa flotante, particularmente las jaulas flotantes, consolidan una mayor acumulación de biomasa neta por ciclo y tasas superiores de supervivencia, al proveer una barrera mecánica eficaz contra el pastoreo de peces y el estrés hidrodinámico.

El análisis sistemático identifica un conjunto de parámetros fisicoquímicos críticos que condicionan el éxito del cultivo en ambas modalidades técnicas: una profundidad de siembra óptima en el estrato superficial entre los 20 y 50 centímetros, flujos hidrodinámicos moderados con velocidades de corriente de 20 a 40 cm/s y un rango térmico de 27 a 30 °C. Asimismo, la procedencia fitosanitaria y genética de las plántulas representa un factor determinante; las semillas micropropagadas mediante técnicas de cultivo de tejidos demuestran una ventaja biológica sustancial frente a los propágulos convencionales de origen local, debido a su vigor metabólico y estado axénico.

Por consiguiente, se recomienda la adopción de un enfoque de gestión holístico y específico para cada emplazamiento, fundamentado en la sincronización del sistema tecnológico, la idoneidad macro ambiental y la calidad de la semilla. Como estrategia de alta eficiencia para optimizar la productividad y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la acuicultura de *Kappaphycus alvarezii*, se sugiere priorizar el despliegue de estructuras de balsa flotante provistas de mallas de protección perimetral, complementadas con el uso exclusivo de plántulas obtenidas por cultivo de tejidos.

La toma de decisiones de los productores locales debe responder de manera adaptativa a las restricciones hidrológicas de su entorno geográfico:

• Zonas protegidas (bajo oleaje y baja herbivoría): El método de "long line" flotante constituye la opción más rentable, ya que maximiza el crecimiento específico individual con una baja inversión de capital.

• Áreas costeras expuestas (fuertes corrientes o alta presión biótica): Se prescribe la implementación de sistemas de balsa flotante con redes de confinamiento. Estas estructuras, a pesar de demandar mayores costos de instalación y mantenimiento, mitigan la pérdida de talos y optimizan el rendimiento volumétrico total.

• Criterios de exclusión y selección biológica: Con independencia de la técnica elegida, es imperativo emplear plántulas micropropagadas derivadas de cepas seleccionadas por su alto rendimiento. Asimismo, se deben descartar taxativamente aquellos emplazamientos que exhiban regímenes hidrodinámicos extremos (velocidades de corriente menores a 5 cm/s o mayores a 40 cm/s) o anomalías térmicas sostenidas que superen los 31 °C.

Esta es una versión resumida, elaborada por el cuerpo editorial de "El Acuicultor", del artículo original "Performance Analysis of the Seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) Cultivation System Based on Culture Units: A Comparison of Longline and Floating Raft Methods" Escrito por Andriani, Y. y Nalibhrata, D. K. 2026. International Journal of Scientific Multidisciplinary Research (IJSMR) Vol. 4, No. 6, pp. 893 – 912 https://journalijsmr.my.id/index.php/ijsmr/article/view/52

EL ROL DE LAS MUJERES EN LA ECONOMÍA AZUL Y LA SEGURIDAD ALIMENTARIA MARINA

Hatch Blue



Women in Ocean Food (WiOF) destaca como uno de los programas de emprendimiento más exitosos de Hatch Blue. Desde su lanzamiento en 2021, la iniciativa ha consolidado su presencia global en tres regiones: el Sudeste Asiático, Latinoamérica y el Caribe, y, recientemente, África. A la fecha, hemos impulsado cinco cohortes integradas por 68 equipos de 32 países; de ellos, 21 *startups* han logrado recaudar más de 12 millones de dólares tras culminar el programa.

Cada ciclo combina estratégicamente empresas orientadas al capital de riesgo con proyectos comunitarios, unidos por un propósito común: el liderazgo de mujeres excepcionales que transforman la economía azul.

Al igual que nuestros otros programas, WiOF combina apoyo empresarial práctico y mentoría sectorial con acceso a nuestra red global. Ayudamos a las fundadoras a desarrollar las capacidades necesarias para



Lecciones de la sesión: Primer estudio de Mujeres en la Alimentación Oceánica de África 2026.

impulsar sus negocios y obtener capital o financiación mediante subvenciones. De este modo, fortalecemos el ecosistema emprendedor en cada región y promovemos la viabilidad temprana de tecnologías y proyectos prometedores que están transformando el sector. Conservation International Ventures ha sido un socio clave desde el inicio, aportando una perspectiva de conservación y financiación filantrópica que complementa nuestro enfoque en la equidad y la comercialización.

El programa principal mantiene la misma estructura en todas sus sedes: un taller de innovación presencial de 10 días, complementado con 12 meses de apoyo continuo para las emprendedoras. Cada edición se adapta cuidadosamente a la cultura de la región y cuenta con la guía de una gestora de comunidad que aporta contactos, experiencias y un enfoque local.

¿Por qué existen las mujeres en la industria alimentaria marina?

Todo comenzó como una iniciativa paralela a un programa global en línea durante la pandemia, donde pusimos en contacto a las emprendedoras con mujeres que ya habían creado negocios exitosos. Estas mentoras no solo compartieron sus consejos empresariales, sino también sus experiencias al emprender como mujer en el sector de la



Innovación en el terreno: Estudio de América Latina y el Caribe 2026.

acuicultura. Ese apoyo adicional entre pares marcó una gran diferencia.

Las mujeres ya constituyen una parte fundamental de la fuerza laboral en la acuicultura, con más del 50 % de participación en la cadena de suministro. Sin embargo, las empresas fundadas por mujeres en este sector siguen recibiendo menos apoyo que sus homólogas masculinas; de hecho, el acceso limitado al crédito y a las instituciones financieras continúa impidiendo que muchas de ellas gestionen sus propios negocios acuícolas (UNESCO, 2024). El programa Women in Ocean Food existe justamente para cerrar esa brecha.

Historias de éxito de exalumnas de WiOF

Ese es el propósito fundamental de Women in Ocean Food: identificar a mujeres líderes excepcionales desde etapas tempranas y brindarles los recursos necesarios para dirigir sus empresas en igualdad de condiciones. Varias exalumnas han logrado levantar capital y actualmente se encuentran expandiendo sus operaciones comerciales:

• Yolanda Herrera, directora financiera y cofundadora de Blue Pond Group (Tailandia): expande la producción de bioactivos derivados de algas marinas en tres continentes.

• Daniela Allerbon, directora ejecutiva de AQUIT (Chile): destaca que sus ensayos con productos de salmón superaron los estándares de la industria.

• Annabell Palacios, fundadora de MareaRosa (Ecuador): obtuvo la certificación ASC Shrimp



Fundadores subiendo al escenario en el LatAm Studio 2024.

Standard para asegurar precios premium y acceder a mercados clave como Estados Unidos.

• Fabiane Almeida, directora ejecutiva de AquaViridi (Brasil): consiguió 1,25 millones de dólares en subvenciones y 250.000 dólares en inversiones para ampliar la producción y validar nuevos extractos.

• Elena Martínez, CTO y cofundadora de SOS Biotech [República Dominicana]: obtuvo la acreditación del USDA, asegurando el acceso al mercado estadounidense y trabajando de manera directa con varios productores estadounidenses.

En conjunto, nuestros tres grupos latinoamericanos han recaudado más de 10,6 millones de dólares, y los exalumnos del sudeste asiático de la promoción de 2022 más de 2 millones de dólares, desde que concluyeron sus estudios. Asimismo, destacadas emprendedoras de nuestro portafolio se han incorporado como mentoras de las nuevas ediciones; entre ellas, Liris Maduningtyas (CEO de JALA) y Brianna Orr Stratton (de *deNova*).

Hacia dónde nos dirigimos a continuación

Juntas, estas emprendedoras están impulsando soluciones revolucionarias en el sector y generando un impacto positivo en sus comunidades. Los próximos pasos de la iniciativa incluyen el lanzamiento de nuestra edición latinoamericana, que tendrá lugar en México a principios de 2027. Asimismo, la segunda edición para África ya está tomando forma, consolidándose sobre las



Visita a una granja durante nuestra primera cohorte del sudeste asiático en 2022.

lecciones aprendidas de la primera cohorte implementada en 2026. Además, estamos trabajando en el desarrollo de un programa plurianual de Women in Ocean Food para el Sudeste Asiático, una de las regiones con mayor producción acuícola a nivel mundial.

Este esfuerzo no sería posible sin el apoyo de aliados estratégicos que ayudan a construir el entorno propicio que estas fundadoras necesitan para prosperar. Entre ellos destacan iAlumbra, The DOEN Foundation, Builders Initiative, The Anchor Foundation, Mustardseed Trust, Aquaculture Stewardship Council, Schmidt Marine Technology Partners, Beyster Foundation y Sea Forward. A esto se suma, por supuesto, la alianza fundamental que hemos forjado con el equipo de Conservation International, cuyo conocimiento práctico y experiencia técnica robustecen el impacto comunitario y la conservación ambiental del programa.

Si deseas sumarte a esta iniciativa para generar igualdad de condiciones para las mujeres en la economía azul, inspirar a la próxima generación de líderes femeninas en el sector e identificar las próximas historias de éxito en tu región, te invitamos a ponerte en contacto con el equipo de Hatch Blue.

Puede acceder al articulo original en ingles a través del siguiente enlace: https://www.hatch.blue/case-studies/women-in-ocean-food

HACIA LA APLICACIÓN DE UN MARCO DE CIRCULARIDAD EN LOS PIENSOS DE ACUICULTURA

Cuerpo editorial de El Acuicultor



Introducción

El concepto de ingredientes circulares está transformando la formulación de piensos en la acuicultura global, impulsado notablemente por los nuevos marcos de circularidad de la Unión Europea y Noruega. Esta transición científica y comercial busca optimizar la sostenibilidad del sector mediante cuatro pilares fundamentales: la reducción de recursos alimentarios tradicionales, la disminución de la dependencia del suelo agrícola, el fomento de materias primas locales y la maximización del valor nutricional de los ingredientes. El gran desafío científico-tecnológico de esta transición radica en equilibrar la complejidad logística y nutricional de estos nuevos componentes con la necesidad de mantener la rentabilidad económica y la calidad del producto final.

Navegar por la complejidad del uso de ingredientes

En las últimas dos décadas, la industria de piensos acuícolas ha transitado del uso de ingredientes marinos a materias primas vegetales. Si bien esto redujo la dependencia de peces silvestres, incrementó la conexión con la agricultura y elevó la huella de carbono global. Actualmente, se prioriza el uso de materias primas sostenibles y de bajo impacto que cumplan con criterios rigurosos: no competir con la alimentación humana, ser competitivas en costo y valor nutricional, garantizar un suministro constante, poseer un perfil rico en nutrientes biodisponibles, cumplir con las normativas de inocuidad alimentaria y generar un bajo impacto ambiental. La adopción de estas prácticas circulares, como la valorización de residuos, el uso de cultivos de bajo impacto (como las macroalgas) y las harinas de insectos, permite mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar los indicadores ambientales y sociales.

Es importante señalar que no todas las materias primas de alta calidad son sostenibles y viceversa; por tanto, la documentación y la trazabilidad resultan esenciales para evaluar su seguridad y adecuación. La adopción generalizada de estas alternativas enfrenta desafíos en términos de escalabilidad, costos, legislación y aceptación del consumidor. Superar estos obstáculos exige involucrar a los productores y educar a los consumidores desde etapas tempranas, fomentando la colaboración en la cadena de valor entre investigadores, legisladores y minoristas.

La creciente demanda de materias primas sostenibles enfatiza la necesidad de metodologías estandarizadas y herramientas de evaluación, como los indicadores clave de rendimiento (KPI) vinculados a la huella ambiental y la evaluación del ciclo de vida (ACV). Dado que la producción de piensos genera hasta el 80 % de las emisiones de GEI en el cultivo de salmón, resulta crucial hallar alternativas que no comprometan la nutrición. Asimismo, es fundamental incorporar indicadores de impacto en la biodiversidad y asegurar la calidad y credibilidad de los datos para optimizar la toma de decisiones.

Los ingredientes más prometedores para la alimentación acuícola son aquellos con bajo volumen de limitación, potencial escalable y cercanía a la cadena de suministro. Materias primas renovables como las algas y los residuos forestales ofrecen ventajas competitivas sobre los insumos tradicionales. No obstante, su consolidación requiere metodologías estandarizadas y alianzas estratégicas para gestionar los intereses de los actores involucrados y superar barreras regulatorias. El diseño de las dietas piscícolas debe centrarse en los nutrientes y no solo en las materias primas individuales. El futuro del sector dependerá de una matriz de ingredientes que satisfaga de manera dinámica los requerimientos nutricionales de las especies, destacando el uso de subproductos industriales (pescado y carne), ingredientes unicelulares y biomasa procedente de niveles tróficos inferiores.

Causas del desafío de las materias primas para piensos

La expansión del sector acuícola enfrenta desafíos críticos para su crecimiento sostenible, entre los que destaca la disponibilidad limitada de materias primas de alta calidad y bajo impacto ambiental. Esta situación se ve agravada por el cambio climático, cuyas condiciones meteorológicas extremas dificultan la producción agrícola de los insumos requeridos por la industria

de piensos, amenazando la seguridad alimentaria global. Asimismo, las tensiones geopolíticas y las crisis sanitarias globales interrumpen de manera recurrente las cadenas de suministro esenciales.

El incremento de la población mundial intensifica la competencia por recursos fundamentales, lo que ejerce una presión severa sobre los ecosistemas. Actualmente, una vasta proporción de las tierras cultivables se destina a la producción de ingredientes para la alimentación animal en lugar del consumo humano directo. En Europa, los marcos regulatorios que restringen el uso de ciertas materias primas vegetales y fomentan el desvío de granos hacia la industria de biocombustibles agudizan esta problemática.

Esta complejidad estructural se profundiza con la reorientación de las pesquerías de captura, las cuales tradicionalmente proveían la harina y el aceite de pescado para la acuicultura y que ahora se canalizan prioritariamente hacia el consumo humano directo. Si bien la industria ha intentado mitigar esta brecha mediante la sustitución por ingredientes vegetales terrestres, esta estrategia perpetúa el conflicto ético y comercial entre los recursos destinados a la alimentación humana y animal. Por consiguiente, resulta imperativo reevaluar el paradigma de la producción acuícola, orientando los esfuerzos hacia sistemas de economía circular fundamentados en una concepción rigurosa y multidimensional de la sostenibilidad.

Competencia mundial de alimentos y piensos

El sistema alimentario mundial genera una intensa competencia por los recursos. Aproximadamente el 15 % de los recursos destinados a la alimentación animal global podría redirigirse al consumo humano directo. En el sector acuícola, hasta el 49 % de los ingredientes utilizados en los piensos compiten directamente con la alimentación humana, en comparación con el 68 % registrado en la avicultura y el 38 % en la producción porcina. Por el contrario, en el caso de los rumiantes, solo entre el 3 % y el 4 % de los componentes del pienso entran en este conflicto de uso.

A nivel global, más del 40 % de la tierra arable y el 30 % de la producción de cereales se destinan a la nutrición animal, siendo los principales cultivos el maíz, el trigo, el arroz y la cebada. La creciente demanda de biocombustibles complejiza aún más esta dinámica de mercado. En 2022, el 41 % de la producción global de granos se utilizó como alimento para animales, el 39 % se destinó al consumo humano y el 6 % se transformó en biocombustibles (**Figura 1**). Se prevé que para el año 2032 la producción de cereales aumente a 4.240 millones de toneladas, lo que intensificará la competencia por los recursos, de no mediar cambios significativos en las proporciones asignadas a piensos y alimentos (**Figura 2**). Actualmente, el uso de cultivos terrestres para la alimentación animal supera al de cualquier otra matriz, incluidos los recursos pesqueros extractivos, de los cuales menos del 10 % se procesa de forma directa como ingrediente para piensos (**Figura 3**).

Hacia un sistema de alimentación circular

Para mitigar la competencia en el nexo alimento-pienso-combustible, resulta esencial gestionar los recursos de manera eficiente e incrementar la circularidad en los sistemas agroalimentarios y de producción de piensos (**Figura 4**). Aunque la circularidad total es inalcanzable debido a las pérdidas termodinámicas inevitables del proceso, el reciclaje de nutrientes mediante ingredientes circulares contribuye a mitigar este conflicto por el uso del suelo y las materias primas.

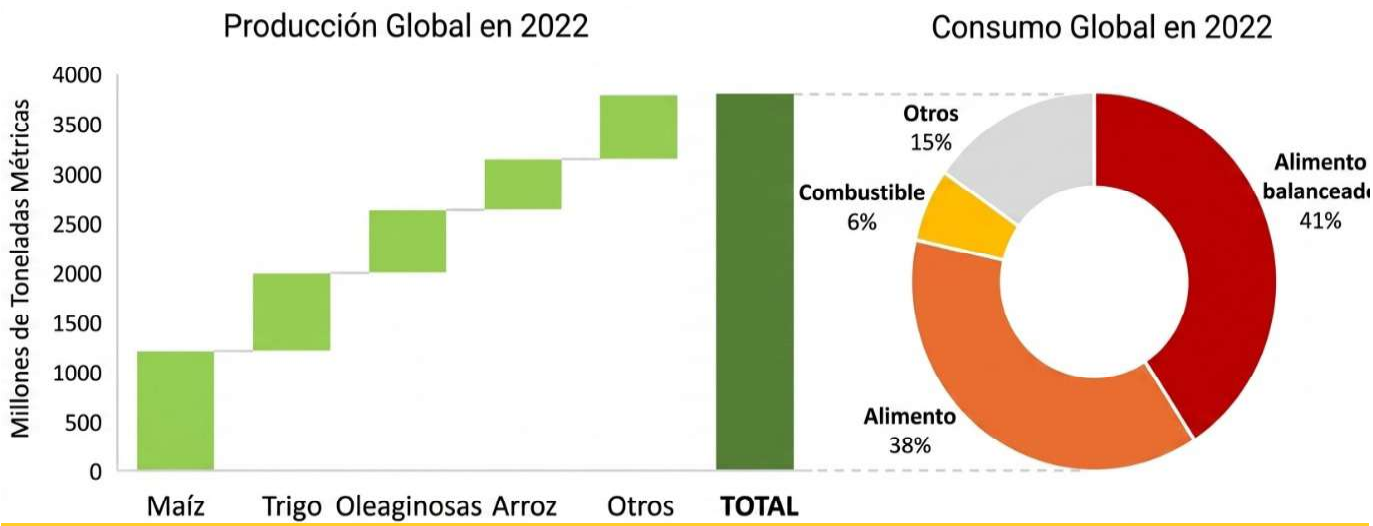


Figura 1. Desglose de la producción mundial de cereales por tipo de grano y usos de consumo para 2022.

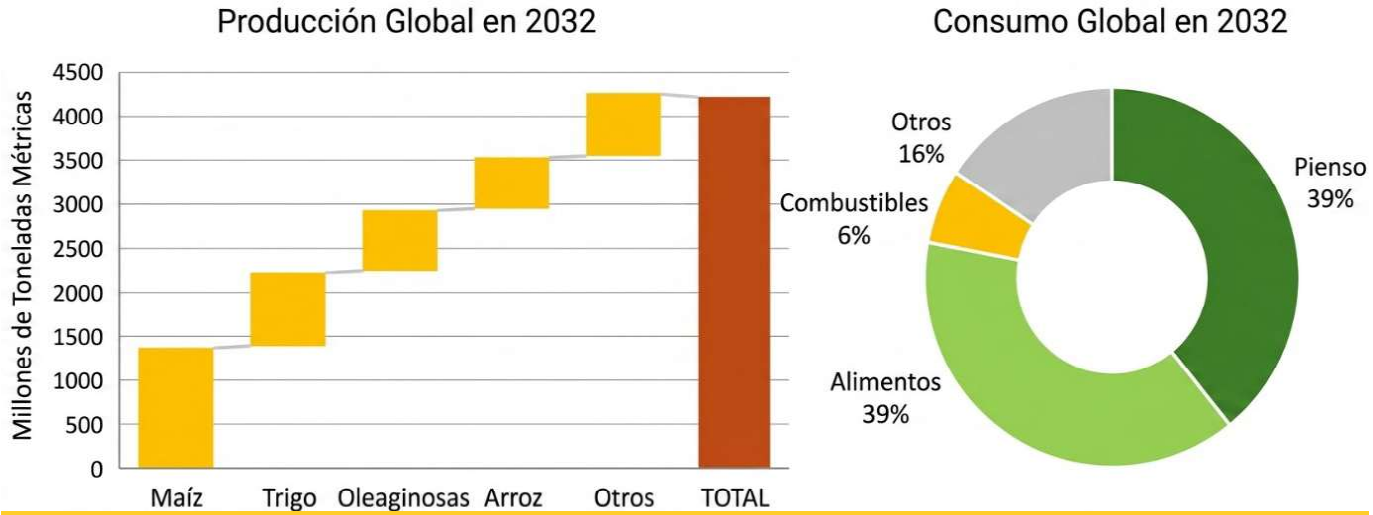


Figura 2. Desglose de la producción mundial de cereales proyectada por tipo de grano y usos de consumo para 2032.

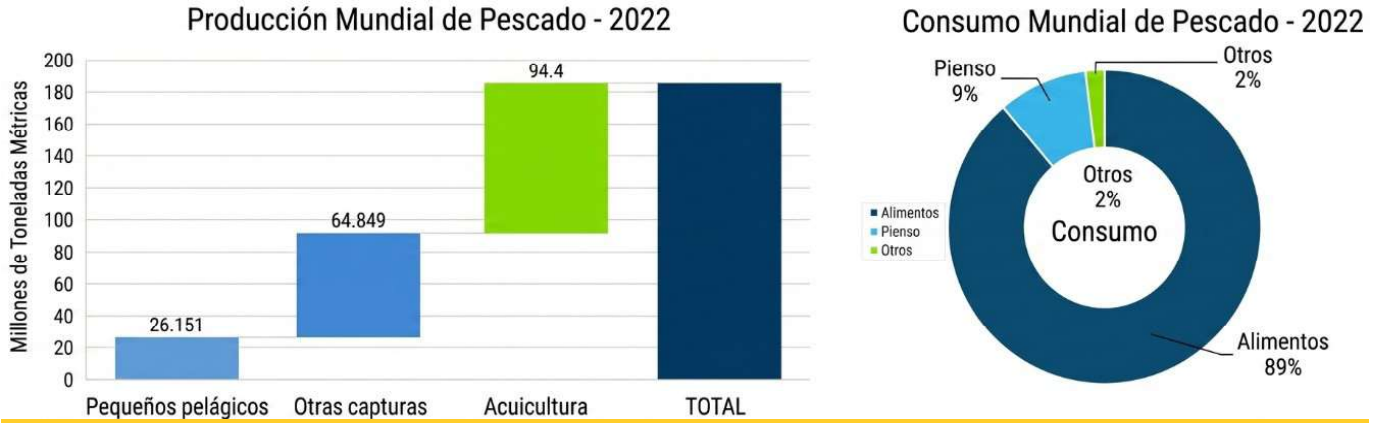


Figura 3. Desglose de la producción mundial de pescado por origen pesquero y acuícola y usos de consumo para 2022.



Figura 4. Jerarquía del uso óptimo de los residuos alimentarios.

Por consiguiente, es necesario desarrollar una estrategia integral que priorice la alimentación humana directa, minimice el desperdicio en toda la cadena de valor y promueva la valorización de los subproductos. En los sectores ganadero y acuícola, la transformación de residuos alimentarios en piensos de alta calidad es técnicamente viable mediante el uso de harinas de insectos, biomasa microbiana y procesos avanzados de fermentación sólida o líquida.

Ante la creciente presión sobre los recursos naturales, resulta imperativo incorporar materias primas emergentes en la formulación de piensos. Las tecnologías de captura y utilización de carbono (CCU), que convierten el CO_2 biogénico y el hidrógeno verde o azul en proteína microbiana mediante fermentación aeróbica, ofrecen soluciones de alto potencial. Estos ingredientes unicelulares, caracterizados por un elevado contenido proteico (superior al 70 %) y una baja huella ambiental, como la biomasa bacteriana heterótrofa, ya cuentan con aprobación regulatoria en la Unión Europea y China para su uso en alimentación animal. Por consiguiente, promover un sistema de base circular que recicle nutrientes y revalorice los flujos de residuos es fundamental para transitar hacia una bioeconomía circular. En este escenario, los marcos legislativos e institucionales son esenciales para impulsar y estandarizar estos enfoques innovadores.

En busca de la sostenibilidad

La sostenibilidad en la industria de la nutrición animal constituye el eje vector para adoptar la circularidad. No obstante, dado que su conceptualización varía entre los diferentes actores de la cadena, el término queda vulnerable a prácticas de greenwashing o blanqueamiento ecológico. Para mitigar este riesgo, los reguladores europeos han establecido criterios estandarizados de sostenibilidad. Un componente esencial es el sistema de evaluación basado en métricas que utiliza el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) bajo el marco de las Reglas de Categorización de la Huella Ambiental del Producto (PEFCR). En este ámbito, el Instituto Global de Evaluación del Ciclo de Vida de los Alimentos (GFLI) provee una base de datos con más de 1.500 ingredientes, lo que facilita la comparación rigurosa de las formulaciones.

A partir de estos datos estandarizados de ACV, los piensos pueden diseñarse para cumplir objetivos ambientales específicos, como la mitigación de la huella de carbono. Por ejemplo, una dieta estándar para el salmón del Atlántico (*Salmo salar*) presenta una huella de carbono inferior a los 2.000

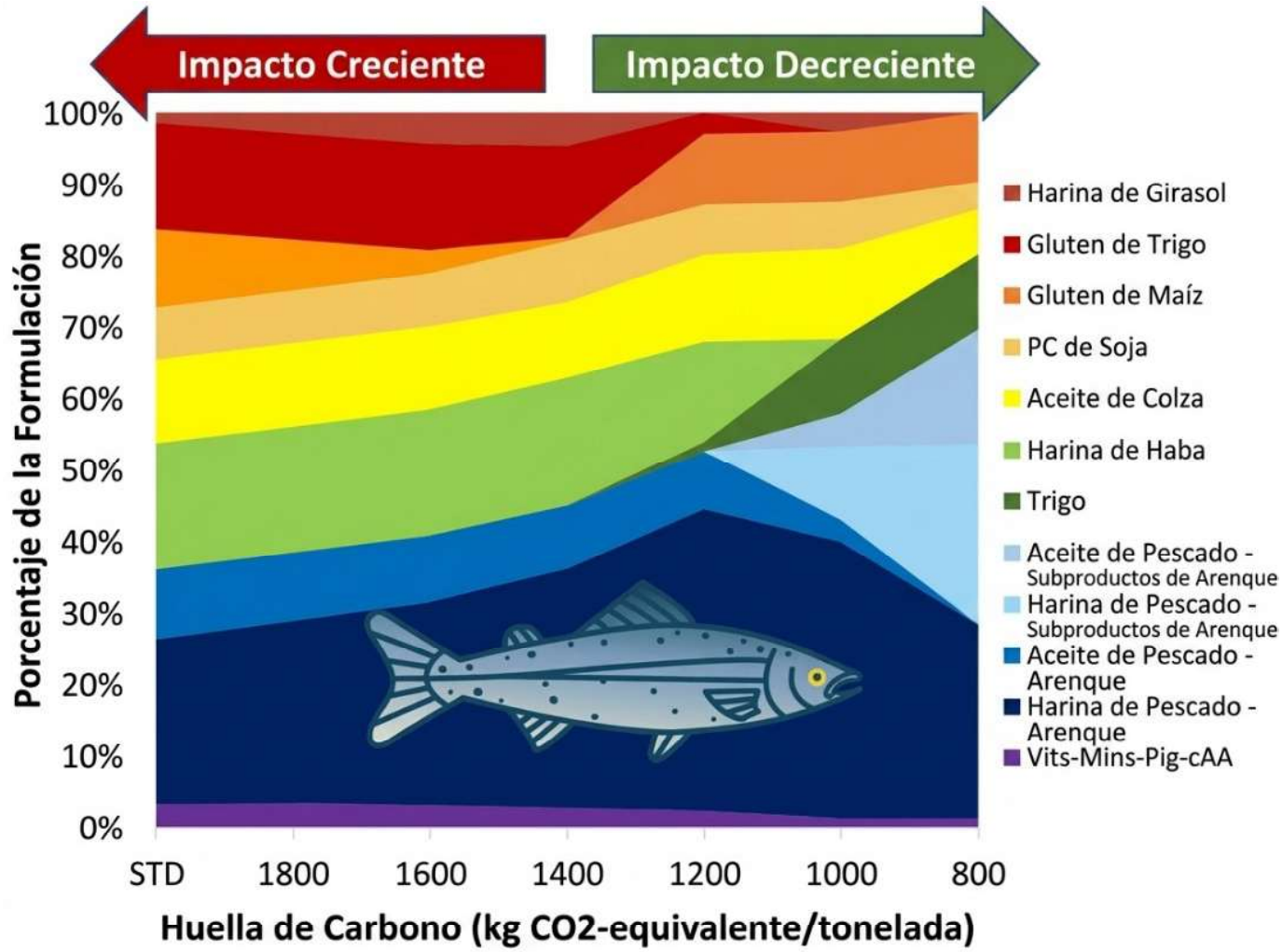


Figura 5. Influencia en la elección de ingredientes cuando la huella de carbono se ve cada vez más restringida en la formulación de una dieta para salmón del Atlántico del hemisferio norte.

kg de CO_2 equivalente por tonelada; la optimización algorítmica de esta formulación permitiría reducir dicha huella en un 33 % con un incremento de apenas 1,2 % en los costos de producción. Este proceso metodológico refleja una reorientación en la priorización de materias primas impulsada por la necesidad de mitigar el impacto climático del sector (**Figura 5**).

Las iniciativas sectoriales recientes han consolidado el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como la metodología con mayor reconocimiento internacional para evaluar los impactos ambientales de productos y servicios, incluidos los piensos acuícolas. Este método estandarizado se fundamenta en la fase de Inventario del Ciclo de Vida (ICV), la cual cuantifica los flujos de entrada (extracción de recursos) y de salida (emisiones al entorno), así como los costos ambientales asociados. Al adoptar un enfoque integral, el ACV evalúa los impactos a lo largo de toda la cadena de valor, reconociendo que las externalidades ambientales, como la huella de carbono, la eutrofización y el uso del suelo y el agua, se extienden mucho más allá de los límites de la unidad de producción final.

Si bien las herramientas secundarias como la base de datos del Instituto Global de Evaluación del Ciclo de Vida de los Alimentos

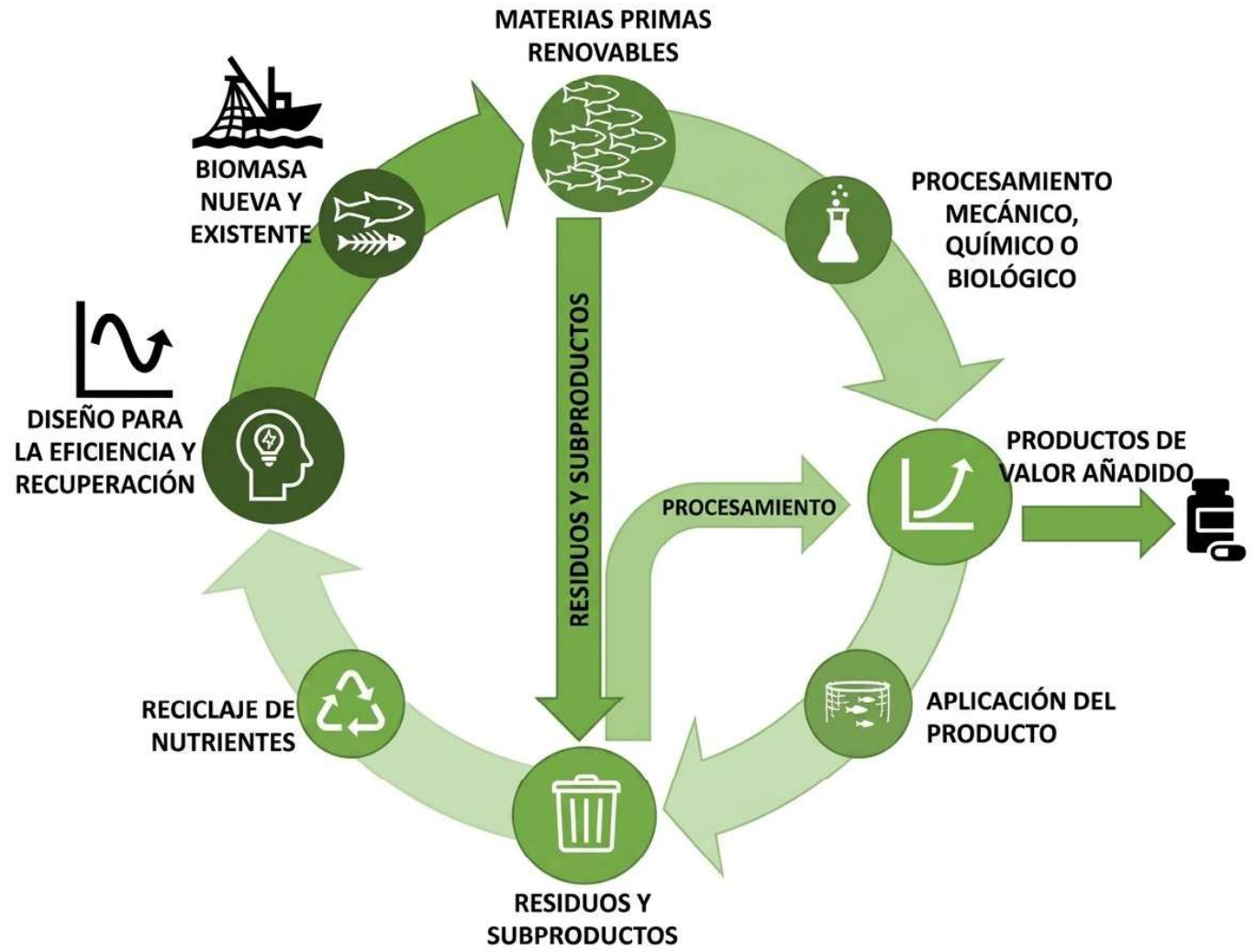


Figura 6. La aplicación de enfoques circulares al uso de alimentos/piensos requiere un mapeo de procesos claro y un diseño para la eficiencia en el uso de recursos y las etapas de recuperación.

(GFLI) resultan instrumentales para estos diagnósticos, los formuladores de piensos priorizan cada vez más la obtención de datos primarios directamente de los proveedores de ingredientes. Esta demanda responde a la alta heterogeneidad intrínseca de los sistemas de producción locales, cuyos valores reales pueden distar significativamente de los promedios globales estandarizados. Bajo este escenario, cobra especial relevancia la adopción de modelos de base circular en la obtención de materias primas; una transición que exige un mapeo riguroso y un ecodiseño de los procesos para maximizar la eficiencia de los recursos y mitigar la huella ambiental del sector (**Figura 6**).

Por qué parte de la respuesta puede implicar pensar de forma innovadora

Un enfoque alternativo en la nutrición acuícola consiste en la utilización de residuos para sintetizar ingredientes bioactivos que optimicen la eficiencia de otras materias primas. Un ejemplo de ello son las harinas obtenidas a partir de subproductos de la pesca y la acuicultura, las cuales contienen factores de crecimiento indeterminados de alto valor para el desarrollo de los camarones. Paralelamente, se diseñan ingredientes microbianos unicelulares que, a pesar de poseer una densidad energética menor, contribuyen a mejorar el rendimiento biológico y la conversión de los piensos.

Las harinas derivadas de biofloc son ricas en compuestos bioactivos que benefician los procesos digestivos y la función inmunológica de los organismos cultivados, aunque su escalamiento comercial aún enfrenta desafíos técnicos. Un caso de éxito es NovaqPro®, una biomasa microbiana que estimula la ingesta de alimento y la resistencia ante patógenos en camarones; este insumo se produce en estanques mediante la valorización de subproductos agrícolas, requiriendo una inversión de capital sustancialmente menor en comparación con las proteínas unicelulares cultivadas en biorreactores convencionales.

Este escenario demuestra cómo la biotecnología circular incrementa la sostenibilidad y el rendimiento de las dietas acuícolas a través de aditivos microbianos funcionales. La literatura resalta la viabilidad de incorporar estos ingredientes a bajas tasas de inclusión, lo que permite una sustitución económicamente rentable de las materias primas tradicionales al priorizar la complementariedad metabólica sobre el reemplazo masivo. No obstante, la sustitución directa de proteínas o lípidos mediante ingredientes microbianos puede verse limitada por las estrictas estrategias de optimización de costos vigentes en la industria global de alimentos balanceados.

Por qué la comunicación es fundamental

La transición hacia una bioeconomía circular exige un cambio sistémico para superar las barreras estructurales a lo largo de la cadena de valor, lo que incluye la adecuación de marcos regulatorios, la maduración tecnológica y transformaciones culturales que optimicen la comunicación y la transparencia entre los actores clave. En determinadas regiones de Europa, la aceptación social respecto al uso de subproductos de origen animal en la formulación de piensos es limitada; una percepción influenciada por narrativas mediáticas adversas y por la presión de colectivos que asocian de forma indiscriminada el aprovechamiento de subproductos con el detrimento del bienestar animal.

Para contrarrestar estas percepciones, el sector industrial debe adoptar estrategias de comunicación transparentes y auditorías de sostenibilidad verificables, siendo crucial articular vínculos sólidos entre la comunidad científica, los tomadores de políticas públicas y la sociedad civil. Si bien la reducción en el consumo de proteína animal contribuye a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), es necesario contextualizar que el impacto directo de la ganadería es moderado en comparación con sectores energéticos e industriales de matriz fósil. Por tanto, las campañas de divulgación deben estructurarse considerando las barreras culturales y las prioridades socioeconómicas individuales.

Modular el consumo de carne a tres raciones semanales permite reducir la huella de carbono individual en una magnitud equivalente a la mitigación de seis vuelos de corta distancia. Esta correlación demuestra que los impactos proambientales significativos pueden alcanzarse a través de un espectro diverso de decisiones individuales. En consecuencia, se subraya la necesidad de descentrar el debate de la sostenibilidad de un enfoque punitivo o enfocado exclusivamente en las elecciones alimentarias, favoreciendo en su lugar una transición social integradora que prevenga conflictos culturales y maximice la aceptación de la circularidad.

Conclusiones

Al aplicar un marco de economía circular a la acuicultura, los cuatro pilares que sustentan el uso circular de ingredientes resultan instrumentales. En este proceso, la caracterización de la calidad nutricional de las materias primas, la asignación eficiente de recursos y las metodologías multivariable para la evaluación de la sostenibilidad constituyen consideraciones críticas. Si bien este modelo ofrece un vector de viabilidad para el desarrollo futuro del sector, aún persisten desafíos sustanciales. Estos incluyen discrepancias empíricas y perceptuales en torno a la sostenibilidad de los piensos, así como la necesidad de unificar los criterios normativos sobre qué representa la sostenibilidad para la acuicultura global. Al adoptar dicho enfoque, es imperativo analizar cómo la industria de alimentos balanceados gestiona actualmente la complejidad logística y nutricional de sus ingredientes.

En este escenario, el objetivo debe centrarse en capitalizar los marcos metodológicos vigentes e implementar de manera rigurosa los principios de circularidad, evitando la duplicación de esfuerzos estructurales. Una estrategia de comunicación científica eficaz será esencial para la consolidación de la bioeconomía circular y para promover la aceptación de estos ingredientes emergentes. Abordar los sesgos, prejuicios y asimetrías de información relacionados con la calidad, el costo y la conveniencia logística del producto contribuirá a cimentar la confianza pública en la seguridad y el desempeño ambiental del sector. Para lograrlo, resulta fundamental que todos los actores de la cadena de valor —desde investigadores y legisladores hasta productores y minoristas— participen activamente en este proceso de gobernanza y divulgación.

Esta es una versión resumida, elaborada por el cuerpo editorial de “El Acuicultor”, del artículo original “Toward Applying a Circularity Framework Against the Use of Aquaculture Feed Ingredients” Escrito por Glencross, B., Bureau, D., Øverland, M., Simon, C., Valente, L. M. P., Gracey, E., y Zatti, K. 2025. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 34(3):343-356.

https://doi.org/10.1080/23308249.2025.2552166

MÁS ALLÁ DEL *VIBRIO*: INNOVACIONES DIAGNÓSTICAS Y MANEJO ESTRATÉGICO PARA LA REDUCCIÓN DE LA MORTALIDAD EN LA CAMARONICULTURA

Dhivagar Pugazhenthi



El cultivo de camarón desempeña un papel crucial en la producción acuícola global y contribuye significativamente al mercado internacional de mariscos. Sin embargo, los brotes de enfermedades siguen constituyendo uno de los principales desafíos que limitan el desarrollo sostenible de esta industria. Entre las patologías más amenazantes se encuentran la vibriosis luminiscente y la enfermedad de la necrosis hepatopancreática aguda (AHPND), ambas capaces de provocar severas pérdidas económicas debido a sus elevadas tasas de mortalidad.

A pesar de la disponibilidad de diversas estrategias de manejo y productos comerciales, los brotes infecciosos aún no se controlan eficazmente en muchos escenarios. Una de las razones principales es la falta de una correcta identificación del agente causal. Sin una observación minuciosa y un diagnóstico preciso, las prácticas de gestión



aplicadas en el terreno corren el riesgo de no abordar con eficacia la condición patológica específica.

En la acuicultura, el diagnóstico de enfermedades generalmente se estructura en tres niveles. Aunque puede resultar complejo para los productores ejecutar la totalidad de estos niveles bajo condiciones prácticas, las observaciones básicas en campo (nivel 1), combinadas con técnicas avanzadas de laboratorio (nivel 3), suelen proporcionar información valiosa sobre el origen de la mortalidad. En ciertas situaciones, también se requiere de métodos diagnósticos intermedios (nivel 2) para confirmar el cuadro clínico. A continuación, se exploran diferentes enfoques diagnósticos y se discuten estrategias prácticas de gestión diseñadas para ayudar a productores y técnicos a comprender y abordar de mejor manera la mortalidad de los camarones en los sistemas de cultivo.

Los productores constituyen la primera línea de defensa ante la aparición de enfermedades en las granjas, actuando frecuentemente como los primeros evaluadores del estado sanitario de sus cultivos. Por lo tanto, el diagnóstico a nivel de estanque desempeña un papel fundamental en la detección oportuna y la gestión temprana de posibles alteraciones de la salud.

Diagnóstico a nivel de granja

Un diagnóstico efectivo a nivel de estanque comienza con una observación minuciosa. Los productores y técnicos deben monitorear regularmente los ejemplares en las áreas de cultivo para detectar variaciones en su apariencia física, comportamiento alimenticio, niveles de actividad y en las condiciones generales del estanque. Los factores clave a evaluar incluyen la tasa de ingesta de alimento, los patrones de natación, la coloración corporal y parámetros físico-químicos del agua como el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y el amonio. La observación constante facilita la detección de anomalías en fases tempranas, lo que permite a los acuicultores implementar medidas correctivas a tiempo.

Asimismo, se recomienda la disponibilidad de un microscopio óptico compuesto en las instalaciones, o bien compartir su uso dentro de una comunidad acuícola local. Capacitar a los técnicos para realizar observaciones microscópicas básicas fortalece significativamente el diagnóstico precoz de patologías. Técnicas sencillas como el examen de montajes en fresco (o frotis en fresco) son de gran utilidad para

identificar ciertos patógenos o alteraciones a nivel de granja.

Por ejemplo, en casos donde se sospecha de una microsporidiosis causada por *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP), suele ser complejo realizar un diagnóstico inmediato por reacción en cadena de la polimerasa (PCR) debido al acceso limitado a laboratorios especializados, especialmente en zonas rurales. En tales escenarios, el examen de un montaje en fresco mediante microscopía compuesta puede proporcionar indicios preliminares a través de la observación directa de las esporas en el tejido hepatopancreático.

En muchos brotes epidémicos, la sintomatología externa observada en los camarones tiende a ser muy similar. Los signos comunes incluyen coloración corporal rojiza, opacidad o decoloración del músculo, letargia, reducción drástica de la ingesta de alimento y un hepatopáncreas pálido o atrofiado. Sin embargo, estas manifestaciones clínicas por sí solas no son suficientes para determinar con exactitud el agente etiológico. Por lo tanto, se requiere un diagnóstico diferencial y definitivo antes de implementar cualquier tratamiento o estrategia de manejo terapéutico.



Echemos un vistazo más detallado al diagnóstico de la enfermedad de los camarones

Los factores ambientales y regionales también influyen de manera directa en la morfología externa de los organismos. Por ejemplo, en una granja situada en Gummidipoondi (Tamil Nadu, India), los camarones mostraban una coloración corporal marcadamente pálida en comparación con estanques de localidades cercanas. Inicialmente, el productor sospechó de un brote infeccioso y comenzó a aplicar diversos tratamientos químicos. Sin embargo, un análisis detallado reveló posteriormente que dicha decoloración era provocada por deficiencias minerales en el suelo del estanque y no por un agente etiológico. Tras ajustar el programa de suplementación mineral, los camarones recuperaron gradualmente su pigmentación normal y la sintomatología desapareció. Este caso resalta la importancia de un diagnóstico diferencial oportuno, ya que el uso empírico e innecesario de insumos químicos incrementa los costos de producción y altera severamente la ecología microbiana de los estanques.

Para realizar evaluaciones diagnósticas básicas en campo (nivel 1), los técnicos pueden ejecutar procedimientos microscópicos sencillos. La superficie externa del exoesqueleto debe examinarse mediante raspados cutáneos para la detección de ectoparásitos o epibiontes. Asimismo, las branquias pueden ser diseccionadas

cuidadosamente para identificar organismos incrustantes, necrosis o parasitismo. El hepatopáncreas también debe extraerse y observarse mediante frotis por presión para evaluar la integridad de los túbulos, la presencia de esporas microsporidias o el grado de acumulación de vacuolas lipídicas. De manera similar, el tracto intestinal puede analizarse bajo microscopía óptica para identificar pigmentaciones inusuales, descamación celular o anomalías estructurales.

Finalmente, resulta de gran utilidad documentar fotográficamente los signos clínicos observados y mantener un registro riguroso de dichos eventos. Estas imágenes, junto con las bitácoras de los parámetros físico-químicos y las prácticas de manejo, pueden ser compartidas con laboratorios de diagnóstico especializados para su validación (nivel 3). El diagnóstico de laboratorio complementario puede incluir el aislamiento microbiológico utilizando medios selectivos, como el agar tiosulfato-citrato-bilis-sacarosa (TCBS), así como medios de cultivo generales para evaluar la morfología colonial. Ante la detección de colonias bacterianas inusuales o potencialmente patógenas, se recomienda proceder con métodos avanzados de identificación molecular, tales como la amplificación del gen del ARNr 16S mediante PCR y su posterior secuenciación genética.

Mantener registros detallados sobre la gestión de los estanques es un componente fundamental en la prevención sanitaria. Los productores deben documentar con regularidad las tasas de alimentación, los parámetros físico-químicos del agua, las aplicaciones de insumos químicos o probióticos, y las condiciones meteorológicas ambientales. Desarrollar un registro visual de los signos clínicos y de las acciones de manejo aplicadas permite a los acuicultores identificar patrones recurrentes ante posibles brotes epidemiológicos. De hecho, algunas granjas diseñan carteles informativos o guías visuales basados en sus experiencias



previas para facilitar que el personal técnico reconozca oportunamente cualquier alteración en el cultivo.

En conclusión, la observación sistemática, la microscopía básica en fresco y la documentación rigurosa constituyen los pilares esenciales del diagnóstico a nivel de estanque. Al fortalecer estas capacidades operativas, los productores están facultados para detectar anomalías en etapas tempranas, evitar el uso empírico de tratamientos innecesarios y optimizar significativamente la eficacia de las estrategias de control de enfermedades en la camaronicultura.

Diagnóstico a nivel de laboratorio

Una vez que se sospecha de una patología a nivel de estanque, el siguiente paso consiste en enviar muestras adecuadas a un laboratorio externo para su análisis detallado. Para garantizar un diagnóstico eficaz, se recomienda remitir ejemplares moribundos o individuos que presenten

signos clínicos claros, ya que estas muestras ofrecen resultados mucho más fiables en comparación con los organismos de aspecto saludable.

La recolección y el manejo adecuados de los especímenes son fundamentales para un diagnóstico de laboratorio preciso. Para obtener directrices detalladas sobre los procedimientos de muestreo y los métodos diagnósticos, se exhorta a los lectores a consultar los manuales oficiales publicados por la Organización Mundial de Sanidad Animal (OMSA). El Manual de la OMSA para Procedimientos de Muestreo proporciona protocolos completos para la recolección, preservación y análisis de laboratorio de las muestras, metodologías que pueden variar según la enfermedad bajo sospecha y el tipo de técnica diagnóstica requerida.

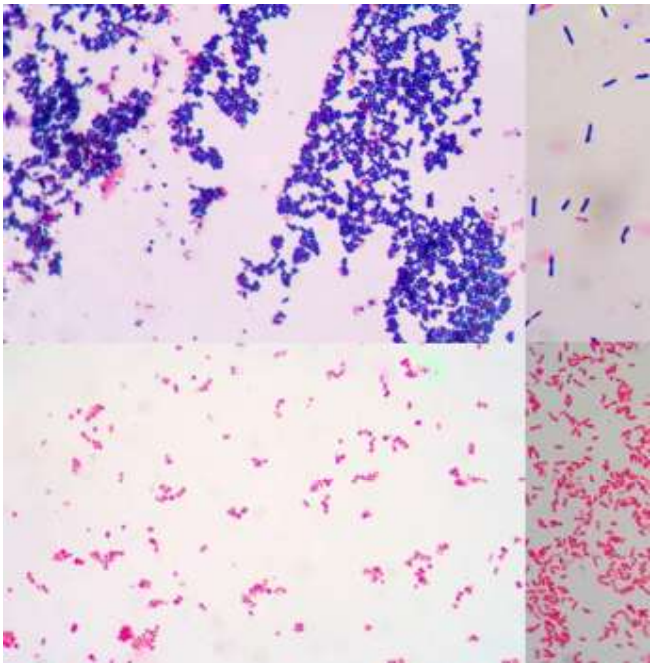
Además de los manuales de la OMSA, el libro Diagnóstico de laboratorio para las enfermedades comunes del camarón ofrece valiosas perspectivas sobre las técnicas prácticas utilizadas para identificar los principales agentes patógenos en crustáceos. Dicha obra brinda orientación detallada sobre el aislamiento bacteriano, la histopatología y los métodos moleculares aplicados en las investigaciones de sanidad acuícola.

Diversos estudios científicos también han contribuido a perfeccionar las técnicas de diagnóstico en la camaronicultura. Por ejemplo, Niu B. *et al.* (2018) reportaron un novedoso método de PCR en tiempo real (qPCR) capaz de distinguir entre cepas patógenas y no patógenas de *Vibrio parahaemolyticus* dentro de una misma muestra, lo cual resulta crítico para la identificación precisa de los linajes causantes de brotes epidémicos.

De manera similar, un estudio desarrollado por Haipeng Cao et al. (2018) identificó a la bacteria *Shewanella algae* como el agente etiológico de la enfermedad de la mancha negra en el camarón blanco (*Penaeus vannamei*). En su trabajo, los autores describieron procedimientos minuciosos de diagnóstico de laboratorio que pueden ser replicados para confirmar la presencia de este patógeno emergente.

Los lectores interesados en explorar estos enfoques diagnósticos con mayor nivel de detalle pueden consultar los artículos de investigación originales de las respectivas referencias.

Además de las especies de *Vibrio*, se ha reportado que diversos patógenos bacterianos causan mortalidades significativas en la camaronicultura. Entre ellos destaca *Aeromonas schubertii*, señalada como letal para el camarón blanco (*Penaeus vannamei*) por Sangpo et al. (2020), así como *Photobacterium damselae* subsp. *damselae*, identificada recientemente por Chuchird *et al.* (2024) como una bacteria patógena emergente que provoca pérdidas masivas en cultivos de esta misma especie. Aunado a estos agentes, otras bacterias como *Spiroplasma penaei* y *Aeromonas hydrophila* también contribuyen de manera recurrente al desarrollo de brotes epidemiológicos en los sistemas de producción, lo que evidencia la necesidad de ampliar el espectro de diagnóstico e investigación sanitaria del sector.



Estrategias de manejo para reducir la mortalidad de los camarones

La gestión eficaz de patologías en la camaronicultura comienza con un manejo adecuado de los parámetros físico-químicos del medio acuático. Las condiciones óptimas del agua desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la homeostasis y salud de los crustáceos, mientras que su deterioro constituye uno de los principales factores desencadenantes de brotes epidemiológicos en los sistemas de cultivo. De hecho, una calidad deficiente del agua debilita la respuesta inmunitaria de los ejemplares, incrementando significativamente su susceptibilidad ante infecciones de origen patógeno.

Parámetro de calidad del agua

El monitoreo regular y la optimización de parámetros clave del medio acuático, tales como el pH, la alcalinidad, el oxígeno disuelto, el nitrógeno amoniacal total (TAN) y el nitrito, son indispensables para mantener un entorno estable. Conservar estas variables dentro de los rangos óptimos mitiga el estrés fisiológico de los organismos cultivados, disminuyendo drásticamente el riesgo de brotes epidemiológicos.

Paralelamente a la gestión físico-química del agua, la camaronicultura avanza hacia la exploración de diversas estrategias biotecnológicas emergentes para el control de enfermedades. Entre los enfoques más prometedores destacan el uso de aditivos fitogénicos, la inoculación de cepas probióticas altamente selectivas, la terapia fágica (bacteriófagos) y el estímulo de la productividad primaria durante las fases iniciales del ciclo de cultivo. Estas alternativas buscan robustecer el estado inmunológico general de los camarones, minimizando la dependencia de tratamientos quimioterapéuticos o desinfectantes sintéticos.

Por ejemplo, un estudio desarrollado por Gutiérrez Falcón et al. (2021) evaluó la actividad antagónica de cepas probióticas aisladas de ambientes marinos frente a *Photobacterium damselae* subsp. *damselae*. Dicho trabajo subrayó criterios rigurosos para la selección de candidatos probióticos efectivos, los cuales incluyen la capacidad de adhesión celular, el crecimiento en moco intestinal, la tolerancia a fluctuaciones de pH y sales biliares, el antagonismo directo contra patógenos, los perfiles de resistencia a antibióticos y la producción de compuestos





antimicrobianos. Estas características constituyen variables críticas al momento de estandarizar inóculos bacterianos benéficos para aplicaciones acuícolas.

Otra herramienta vanguardista es la terapia con bacteriófagos, la cual consiste en la aplicación de virus líticos que infectan y destruyen de manera dirigida a bacterias patógenas blanco. Investigaciones recientes de Chao Zeng et al. (2025) demostraron que los tratamientos basados en fagos fortalecen la salud de los camarones al potenciar la expresión génica inmunitaria innata, regular favorablemente el metabolismo lipídico, robustecer la resistencia sistémica ante infecciones y elevar las tasas de supervivencia durante desafíos experimentales frente a *Vibrio parahaemolyticus*.

De forma complementaria, la ingeniería del microbioma adquiere notoriedad como un enfoque prometedor para la exclusión competitiva de patógenos. Al modular de forma dirigida la comunidad microbiana asociada al hospedero y a su entorno, es posible potenciar las respuestas inmunitarias y optimizar la resiliencia celular bajo condiciones de estrés ambiental. Los avances en herramientas ómicas modernas, tales como la genómica y la metagenómica, se emplean actualmente para identificar biomarcadores microbianos específicos y diseñar consorcios probióticos de alta eficiencia para combatir microorganismos oportunistas.

En conclusión, la integración de una gestión rigurosa de los parámetros del agua con las estrategias emergentes de control biológico incrementa significativamente la bioseguridad, la prevención sanitaria y la sostenibilidad de la camaronicultura global.

Conclusión

Hemos destacado la importancia de un diagnóstico preciso de patologías y de estrategias de manejo adecuadas para mitigar la mortalidad en la camaronicultura. Las observaciones preliminares a nivel de estanque, combinadas con herramientas diagnósticas de laboratorio validadas, facilitan la identificación del agente etiológico de los brotes epidemiológicos, optimizando la toma de decisiones en la gestión operativa de las granjas.

Referencias

A la disposición directamente a través del autor o a través de la Sociedad Venezolana de Acucicultura.

Puede acceder a la versión original del artículo a través del siguiente enlace:

https://dhivagarofficial.blogspot.com/

TRAZABILIDAD EN ACUARIOS MARINOS: ¿CAPTURADOS O CULTIVADOS?

Mónica Yumi Tsuzuki / monica.tsuzuki@ufsc.br

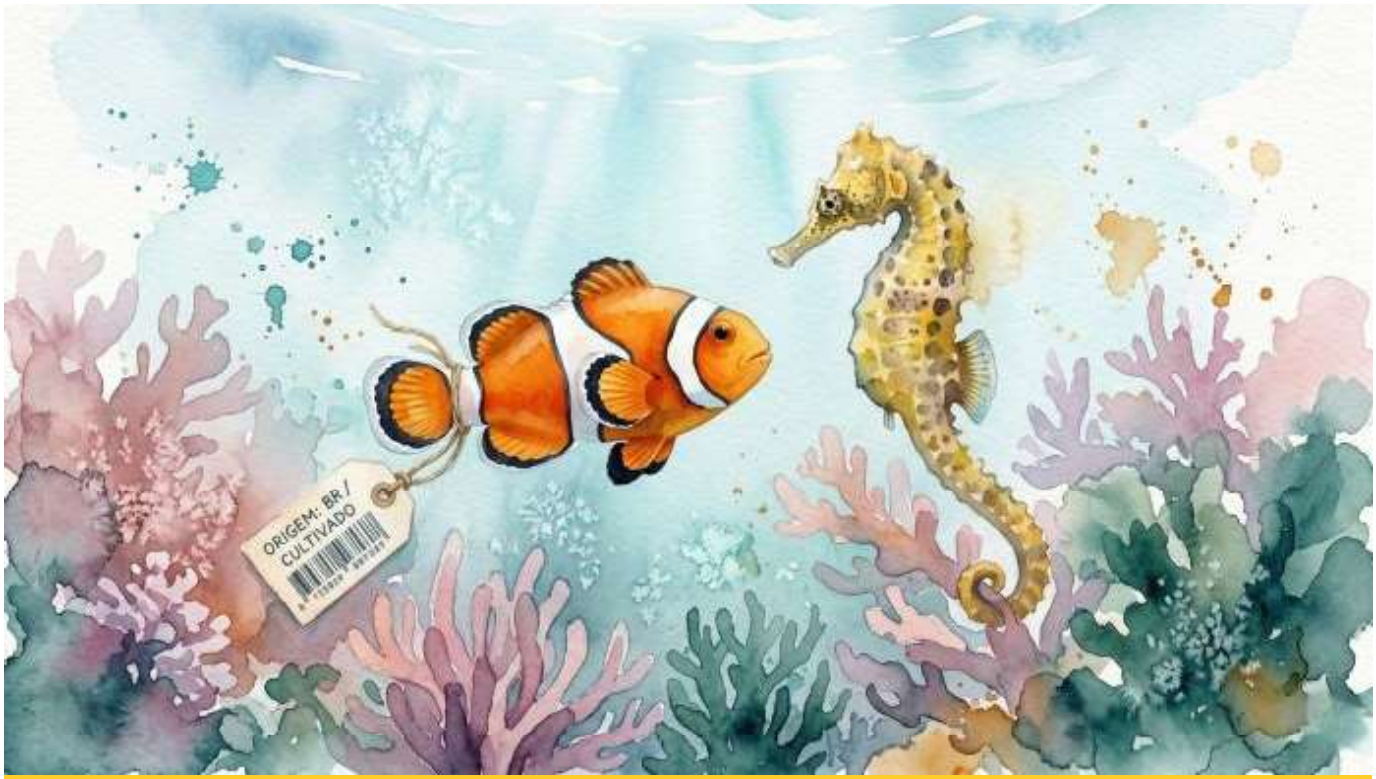


Ilustración de la columna "Acuicultura ornamental marina".

La trazabilidad está presente en múltiples sectores, desde la producción de hortalizas y medicamentos hasta la industria automotriz. Su función consiste en monitorear y registrar cada etapa de la cadena de suministro, desde el origen de la materia prima hasta la entrega del producto final. Este proceso es fundamental para garantizar la calidad, la eficiencia, la seguridad y la transparencia de los sistemas de producción.

En acuicultura, la situación es similar. Además de monitorear las etapas de producción, se consideran aspectos como el origen del producto (ubicación geográfica, captura en un entorno natural o cultivado), el modelo de cultivo (orgánico o intensivo) y las condiciones de manejo. En el cultivo de salmón, la trazabilidad abarca todas las fases de producción, desde el huevo hasta la llegada del producto al mercado. Este control

garantiza la calidad del pescado, el monitoreo sanitario y la seguridad alimentaria, especialmente en casos de contaminación. Asimismo, contribuye a la sostenibilidad de la actividad al garantizar que la producción cumpla con los estándares ambientales y las prácticas acuícolas responsables, promoviendo una mayor transparencia para los consumidores y otros eslabones de la cadena de producción.

Si bien el concepto de trazabilidad es relativamente sencillo, su implementación y funcionamiento son complejos. Durante años, este mecanismo ha sido objeto de amplios debates en el sector acuícola, especialmente en la producción de peces ornamentales marinos, centrándose principalmente en las especies vulnerables o en peligro de extinción. Según la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES), la trazabilidad es la capacidad de acceder a información relacionada con los especímenes y los eventos registrados a lo largo de toda la cadena de suministro.

Así como la acuicultura se postula como una vía de mitigar el declive mundial de la pesca extractiva, la expansión del suministro de organismos ornamentales de cultivo se ha planteado como el futuro del comercio de especies ornamentales marinas.

El mercado de la acuariofilia es una industria global multimillonaria que involucra a decenas de países. En este sector, donde menos del 10 % de los peces ornamentales marinos se producen comercialmente mediante acuicultura, se estima que millones de individuos son extraídos anualmente de los arrecifes de coral para abastecer el comercio internacional. La captura de poblaciones silvestres para el mercado mundial de acuarios ha generado crecientes preocupaciones sobre la sostenibilidad, especialmente en lo que respecta a las especies amenazadas. Entre los ejemplos más emblemáticos se encuentra el pez cardenal de Banggai (*Pterapogon kauderni*), una especie endémica de Indonesia y actualmente clasificada como amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Aunque ya se logra su reproducción en cautiverio, la sobreoferta de ejemplares silvestres a bajo costo ha contribuido significativamente a la disminución de sus poblaciones naturales, lo que motivó su inclusión en mecanismos de protección como CITES y la Ley de Especies en Peligro de Extinción (ESA, por sus siglas en inglés). Los caballitos de mar del género *Hippocampus*, ampliamente comercializados, están catalogados como vulnerables, y todas sus especies se encuentran bajo la regulación de la CITES.

Si bien es importante garantizar que las especies ornamentales marinas se obtengan de manera legal y se aprovechen de forma sostenible, su seguimiento y trazabilidad a lo largo de toda la cadena de suministro sigue constituyendo un desafío complejo.

El mercado de peces ornamentales marinos se caracteriza por una cadena de suministro compleja y fragmentada. Esta condición responde a las particularidades geográficas de los países de origen y a las múltiples etapas de transporte, las cuales involucran a una inmensa red de intermediarios (recolectores locales, exportadores, importadores, distribuidores y minoristas), prolongando significativamente el trayecto del espécimen hasta el consumidor final. Asimismo, existe una marcada escasez de datos estadísticos a nivel global, situación agravada por la falta de organismos reguladores centralizados que supervisen de manera integral esta actividad comercial.



Por lo tanto, identificar con precisión el origen de los ejemplares, tanto para determinar su procedencia geográfica como para distinguir entre individuos cultivados y silvestres, se convierte en un gran desafío, especialmente debido a la falta de transparencia y la multiplicidad de actores involucrados en la cadena comercial. La ausencia de sistemas de trazabilidad eficaces dificulta la evaluación del impacto ambiental real del comercio de organismos marinos ornamentales, ya que no existen datos fiables sobre cuántos individuos se extraen de los arrecifes naturales y cuántos provienen de la acuicultura. Esta deficiencia implica que los ejemplares capturados en el medio natural sean comercializados fraudulentamente como criados en cautiverio o, a la inversa, que organismos de cultivo se vendan como si fueran de origen silvestre.

Se han desarrollado o adaptado diversos métodos de marcaje para abordar estas problemáticas en los peces, los cuales incluyen marcadores externos e internos, observaciones morfológicas y análisis químicos, moleculares y microbianos. Si bien algunos de estos enfoques son menos invasivos y destructivos, al utilizar fragmentos de aletas, escamas o mucosidad, muchos de ellos requieren una combinación de diferentes metodologías. Además, los resultados pueden verse influenciados por las fluctuaciones ambientales y, en ocasiones, exigen el muestreo a partir de especímenes vivos. Estos métodos también demandan el uso de laboratorios especializados, lo que incrementa los costos y los tiempos de análisis, limitando su aplicación práctica en el campo.

Por su parte, la documentación oficial constituye una herramienta complementaria para los sistemas de trazabilidad biológica antes descritos. Esta incluye licencias, permisos ambientales, registros del lugar de captura o cultivo, seguimiento de lotes e historiales de transporte y comercialización. Asimismo, abarca el uso de plataformas de monitoreo electrónico como el Sistema de Control Comercial y Experto (TRACES) en la Unión Europea o el Sistema Integrado

de Comercio Exterior (Siscomex) en Brasil, los cuales exigen declaraciones explícitas sobre el origen —silvestre o cultivado— de los organismos. Sin embargo, la fiabilidad de estos instrumentos normativos sigue supeditada a la veracidad de las declaraciones proporcionadas por los exportadores y a la eficacia real de los mecanismos de inspección en aduanas.

Caso caballito de mar *Hippocampus reidi*

Históricamente, los caballitos de mar del género *Hippocampus* se han capturado a gran escala con el propósito de ser utilizados en estado seco por la medicina tradicional china y con fines religiosos, además de comercializarse vivos para el mercado de la acuariofilia. Asimismo, la degradación de sus hábitats críticos debido a los desarrollos costeros, la contaminación, la pesca incidental y el cambio climático ha puesto en riesgo la viabilidad de sus poblaciones naturales. Como consecuencia de estas presiones antrópicas, múltiples especies están clasificadas actualmente en categorías de amenaza, como vulnerables o casi amenazadas, por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Aunque un alto porcentaje de caballitos de mar se extrae ilícitamente de poblaciones silvestres, causando severos impactos en la dinámica de los ecosistemas marinos, algunas especies ya se producen con éxito mediante la acuicultura. Por lo tanto, determinar con precisión el origen de estos ejemplares puede incentivar la comercialización de organismos criados en cautiverio, permitiendo que el desarrollo acuícola se consolide como una herramienta estratégica para desincentivar y reducir la presión extractiva sobre las pesquerías silvestres.

Hippocampus reidi está clasificado como vulnerable por la Ordenanza MMA N.º 445/2014 y figura en el Apéndice II de CITES, lo que exige un estricto control comercial. También se consideran en la Constitución Federal, la Ley de Protección de la Fauna Silvestre, la Ley de Delitos Ambientales, el Decreto N.º 3607/2000, que incorpora CITES, y la Ordenanza SAP/MAPA N.º 17/2021, que trata sobre el uso sostenible de peces ornamentales nativos.

Actualmente, la producción y comercialización de *H. reidi* en Brasil por la empresa Hippocampus Aquicultura, Pesquisa e Conservação Marinha Ltda. requiere monitoreo técnico, inspecciones y autorización específica de agencias ambientales, especialmente del IBAMA, para verificar la capacidad productiva real y garantizar que los ejemplares nazcan y se críen efectivamente en cautiverio. La autorización para la comercialización de animales producidos por esta empresa se limita exclusivamente a la exportación de animales cultivados. Las ventas al mercado interno aún dependen de la creación de mecanismos regulatorios y operativos capaces de asegurar la trazabilidad, el origen legal y un control efectivo, evitando que el comercio autorizado se utilice para legitimar ejemplares extraídos ilegalmente de su hábitat natural.

Uno de los principales desafíos radica en que los caballitos de mar son organismos pequeños y extremadamente delicados, lo que imposibilita la aplicación de los métodos convencionales de identificación individual utilizados en otros grupos de fauna, como microchips, anillos y marcas tradicionales. Ante esta situación, el desarrollo de un sistema de marcado y trazabilidad eficaz y fiable se vuelve esencial. En este contexto, esta empresa ha estado realizando estudios

centrados en el desarrollo de métodos de trazabilidad prácticos, rápidos y de bajo costo para demostrar el origen de los animales.

De acuerdo con la empresa, también sería posible adoptar medidas de control complementarias, como la venta directa al consumidor final y, eventualmente, a un número limitado de establecimientos previamente acreditados. Entre los mecanismos propuestos se encuentran el registro obligatorio de compradores, la emisión individualizada de facturas, la vinculación de cada ejemplar con su lote de origen y el registro de variables zootécnicas como la edad, el linaje y la ascendencia de los animales. La propuesta también prevé el suministro controlado de alimentos específicos únicamente a clientes registrados, así como el envío periódico, dentro del proceso administrativo, de listas de compradores y lotes vendidos. Además, la venta de ejemplares del mismo sexo en cada pedido reduciría el potencial de cría doméstica no autorizada. Otra medida sugerida sería limitar el tamaño de los animales vendidos, dificultando así la introducción en el mercado legal de ejemplares capturados en la naturaleza.

Se espera que se desarrollen protocolos de trazabilidad eficaces, fiables, prácticos y menos costosos para contribuir significativamente a la reducción del comercio ilegal de especies protegidas, así como para ayudar en la detección de prácticas ilícitas como el etiquetado incorrecto de los animales comercializados.

Este artículo fue publicado originalmente en la página web de Aquaculture Brasil el 9 de junio de 2026. Puede acceder al artículo original a través del siguiente enlace: https://aquaculturebrasil.com.br/colunas/aquicultura-ornamental-marinha/rastreabilidade-na-aquariofilia-marinha-capturado-ou-cultivado/



VALERSE POR SÍ MISMAS: LAS MUJERES QUE DOMINAN LA ACUICULTURA EN KENIA

Peter Changtoek



Mathilda Amollo, tercera de izquierda a derecha. Foto: Peter Changtoek.

En Kenia, la acuicultura se considera un sector predominantemente masculino. Sin embargo, algunas mujeres han decidido romper con esta tendencia, llegando a gestionar grandes piscifactorías que producen cientos de toneladas de pescado al año.

Una de estas piscicultoras es Angela Odero, propietaria de Rio Fish. Licenciada en finanzas, contabilidad y administración, estudió en la Universidad de West London y en la Universidad de Cumbria, y además es contadora pública certificada. Ha desempeñado diversos cargos tanto en el Reino Unido como en Kenia, con especialización en finanzas y estrategia.

“Me apasiona profundamente empoderar a las mujeres y jóvenes desfavorecidos, especialmente en las comunidades rurales. La agricultura siempre ha sido mi vocación. Antes de incursionar en la acuicultura, gestioné empresas de avicultura, tomates y pimientos, abasteciendo a supermercados y restaurantes locales. Gracias a estas experiencias, desarrollé un profundo aprecio por la agricultura, no solo como negocio, sino también como herramienta para mejorar los medios de vida y fortalecer las comunidades”, afirma.

Al crecer en los alrededores del lago Victoria, fue testigo directo de las dificultades que enfrentaban las mujeres para acceder al pescado, tanto para el comercio como para la alimentación familiar. La cadena de suministro estaba controlada en gran medida por hombres, y muchas comerciantes quedaban excluidas de oportunidades lucrativas o eran explotadas para asegurar su abastecimiento. Al mismo tiempo, las poblaciones de peces silvestres disminuían constantemente debido a la sobrepesca y las presiones ambientales.

Odero afirma: "Esta situación me preocupó profundamente y me impulsó a buscar una solución sostenible. Quería crear oportunidades para que las mujeres tuvieran acceso a pescado nutritivo para sus familias, al mismo tiempo que obtenían un sustento digno y sostenible. Cuando descubrí la acuicultura en Uganda, reconocí de inmediato su potencial para abordar estos desafíos. Me tomé el tiempo necesario para comprender cómo funcionaba la industria, la inversión requerida y las consideraciones legales y ambientales involucradas. Con convicción y una visión clara, convencí a mi esposo y juntos invertimos nuestros ahorros para fundar Rio Fish".

Hoy, afirma, Rio Fish representa más que un negocio: "Es una plataforma para empoderar a las mujeres y a los jóvenes, promover la acuicultura sostenible, mejorar la seguridad alimentaria y transformar la vida dentro de las comunidades pesqueras".

La granja está situada en la playa de Rasira (Suba South, condado de Homa Bay). Ubicada a lo largo de hermosas costas de arena negra con vistas a las aguas cristalinas del lago Victoria y cuenta con una capacidad de producción de más de 400 toneladas anuales.

Odero afirma que la acuicultura es tradicionalmente un campo dominado por los hombres, pero su trayectoria ha estado impulsada por la pasión de crear oportunidades sostenibles para las mujeres.

Ella afirma: "Gracias a alianzas estratégicas, innovación, adaptabilidad y un enfoque en trabajar de forma más inteligente, hemos logrado crecer y mantener el negocio. Lo más importante es que nuestra misión de empoderar a las mujeres y a la juventud sigue siendo el eje central de todo lo que hacemos, y ese propósito me inspira cada día".

"Trabajamos estrechamente con nuestra comunidad local, que sigue siendo el pilar de todo lo que hacemos. Nuestras alianzas incluyen colaboradores afines, financiadores, instituciones gubernamentales y jóvenes profesionales que comparten nuestra visión de un desarrollo acuícola sostenible e inclusivo. Las mujeres y los jóvenes son nuestra prioridad, ya que estamos comprometidos a crear oportunidades que les permitan desarrollarse económicamente mediante la acuicultura sostenible, la agregación de valor y el acceso al mercado. Al colaborar con diversos actores, seguimos construyendo un ecosistema que promueve la innovación, la resiliencia y la prosperidad compartida dentro de la economía azul".

Rio Fish utiliza tecnología de acuicultura inteligente basada en datos y energía solar. Además, gestiona de forma directa procesos como el eviscerado, el pesaje y la agregación de valor a sus peces.

Odero afirma: "Más allá de la manipulación básica, también procesamos el pescado para convertirlo en productos de valor agregado, como filetes y otras formas de productos elaborados, para satisfacer las diferentes necesidades de los clientes y los distintos segmentos del mercado".

La empresa cría tilapia, pero también distribuye perca del Nilo, bagre y sardinas en todo el país. Asimismo, produce alevines

y piensos para peces, al tiempo que apoya a las mujeres en la producción de tilapia, un producto que luego les compra y distribuye.

Entre los logros más destacados de la empresa se encuentran:

- El establecimiento de una piscifactoría de tilapia en jaulas en el lago Victoria, con una capacidad de producción anual de aproximadamente 400 toneladas.

- El desarrollo de un centro de acopio y procesamiento para optimizar la manipulación del pescado y reducir las pérdidas postcosecha.

- El empoderamiento y la inclusión de mujeres y jóvenes en la acuicultura a través de capacitación, acceso al mercado y participación en el cultivo y la comercialización.

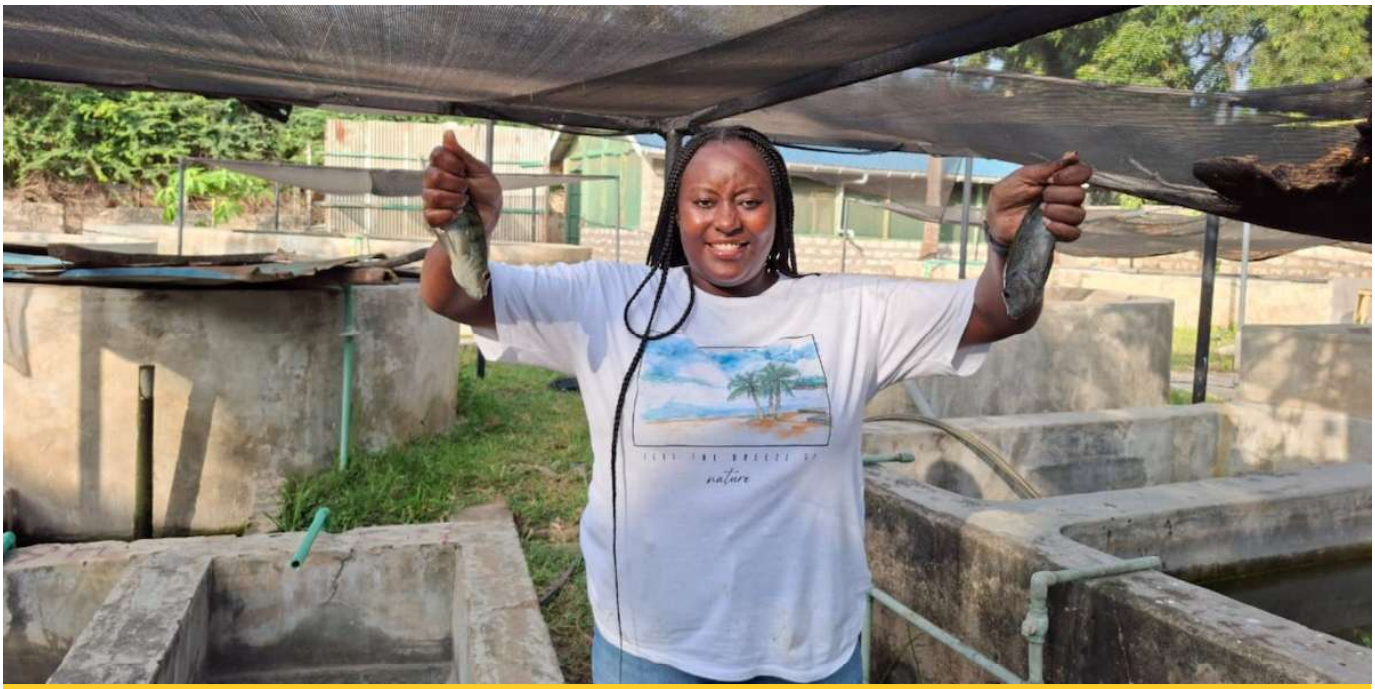
- La promoción de prácticas acuícolas sostenibles y resilientes al clima dentro de las comunidades pesqueras.

- La introducción y desarrollo de productos pesqueros de valor agregado orientados a los mercados urbanos.»

Otros logros importantes incluyen: la adopción de iniciativas de energía limpia y economía circular, incluida la modernización de un biodigestor para producir gas para el secado de pescado y el suministro de energía a cámaras frigoríficas; y la ampliación del acceso al mercado mediante asociaciones con comerciantes, minoristas, agregadores y consumidores domésticos.

Sin embargo, Odero afirma que existen algunos retos por superar, especialmente el acceso a una financiación adecuada, el cual sigue siendo una limitación importante.

Ella afirma: “También estamos trabajando para fomentar la adopción de la acuicultura entre las mujeres, garantizando una participación más inclusiva en el sector. Además, muchos acuicultores aún se muestran reacios a adoptar piensos de calidad y prácticas acuícolas basadas en datos, aunque seguimos colaborando con ellos, capacitándolos y demostrando los beneficios a largo plazo de estos enfoques. El acceso a



Eliana Macharia. Foto: Peter Changtoek.

una infraestructura de cadena de frío fiable sigue siendo un reto importante para muchos actores de la cadena de valor, lo que provoca pérdidas y desperdicios postcosecha. Abordar esta brecha es fundamental para mejorar la eficiencia, reducir las pérdidas y aumentar la rentabilidad general del sector".

De la informática al lago Victoria

Por otra parte, en la isla de Mfangano, ubicada en el lago Victoria, otra piscicultora dirige una exitosa empresa que ha demostrado que esta actividad no es solo cosa de hombres. Se trata de Michelle Mbeo, fundadora de Lake View Fisheries Limited (LVF)

Gracias a su sólida trayectoria en liderazgo y desarrollo organizacional, tras haber desempeñado cargos directivos en destacadas empresas tecnológicas internacionales como Accenture y GE Healthcare, Mbeo está decidida a llevar su empresa acuícola a un nivel superior.

Ella afirma: "Mi experiencia en tecnología de la información es fundamental para la implementación de software y tecnología líderes en la industria en Lake View Fisheries Limited".

La granja se fundó hace 13 años. "Nuestro avanzado centro de reproducción produce hasta un millón de alevines de peces de alta calidad por ciclo, utilizando sistemas de recirculación acuícola (RAS) y estanques de tierra", afirma Mbeo.

La empresa destina parte de su producción a sus propias operaciones, mientras que el excedente se vende a productores de la zona, impulsando así el crecimiento de la acuicultura regional. Lake View Fisheries utiliza jaulas de engorde con una capacidad de producción de hasta 1.000 toneladas de tilapia fresca al año.

La empresaria revela que Lake View Fisheries emplea a 18 personas de forma permanente y a 33 trabajadores temporales, de las cuales el 66 % son mujeres.

Los alevines se crían en jaulas individuales y el excedente se vende a pequeños piscicultores que forman parte de la plataforma de gestión de engorde de Lake View Fisheries, la cual cuenta con un total de 1.200 productores. Asimismo, parte de los alevines se comercializan mediante licitaciones públicas y privadas. Por otro lado, el pescado fresco se vende a comerciantes y consumidores directos a través de las ocho tiendas de la empresa, mientras que otra parte se suministra a escuelas y eventos en las comunidades.

El alimento para peces representa hasta el 65 % de los costos de producción de Lake View. Para optimizar este recurso la empresa adquiere piensos de alta calidad, respetuosos con el medio ambiente (en forma de pellet flotantes), de un proveedor local homologado: Tunga Feeds.

Lake View Fisheries busca expandir su mercado más allá de la provincia de Nyanza. La empresa pretende llegar a una base de clientes más amplia en Kenia, que incluye las principales cadenas de supermercados, mayoristas y minoristas de productos del mar, así como a cadenas de restaurantes. "Durante los próximos cinco años, Lake View Fisheries planea explorar oportunidades para exportar su tilapia de alta calidad a compradores internacionales como importadores de mariscos, distribuidores y restaurantes".

Al adentrarse en estos nuevos mercados, la empresa busca diversificar sus fuentes de ingresos y consolidarse como un proveedor fiable de productos de tilapia de primera calidad tanto a nivel nacional como internacional.



Angela Odero, cuarta de derecha a izquierda. Foto: Peter Changtoek.

Oportunidad en el lago

Mathildah Amollo es otra piscicultora que está prosperando en la acuicultura de Kenia, un sector tradicionalmente dominado por hombres. Esta emprendedora, licenciada en Comercio con especialización en Contabilidad y con 20 años de experiencia en el ámbito financiero de la hotelería, es la fundadora de Greatlakes Feeds Ltd, una empresa social ubicada en las orillas rurales del lago Victoria, en el condado de Siaya.

"Mi trayectoria en la acuicultura comenzó en 2016, cuando visité mi pueblo natal durante las vacaciones y vi a mujeres obligadas a prostituirse para obtener pescado con el que alimentar a sus familias y mantener sus pequeños negocios de pesca. Fue desgarrador presenciarlo. Me motivó a crear una empresa que ofreciera una solución a la escasez de pescado y empoderara a las mujeres para que produjeran pescado de forma sostenible", afirma. La empresa cuenta con una capacidad mensual de producción de un millón de alevines y 180 toneladas de alimento para peces.

Amollo explica: "Para la producción de alevines, contamos con estanques y criaderos con sistema de recirculación acuícola (RAS). Asimismo, para la elaboración del alimento, disponemos de toda la línea de producción: desde molinos de martillos, extrusoras y peletizadoras hasta modernas unidades de secado, todas alimentadas con energía solar. Los insumos se adquieren en la comunidad local, el equipo se fabrica, ensambla y construye internamente, y los alevines también se producen en nuestros propios criaderos. Colaboramos con productores locales de la comunidad que proveen las materias primas para la producción de alimento. Actualmente, estamos colaborando con el programa de empoderamiento para mujeres del Fondo Africano para el Desarrollo Empresarial (Africa Enterprise Challenge Fund)".

Según explica, se eligió la tilapia porque es resistente, de rápido crecimiento, económica de criar y tiene una demanda muy alta en Kenia y en todo el mundo, lo que la convierte en una de las opciones de acuicultura más rentables y sostenibles.

Greatlakes Feeds vende el pescado en su punto de desembarque a orillas del lago, a precios que oscilan entre los 300 y 350 chelines kenianos (1,73 - 2,02 £) por kilo. Si bien la empresa aún no ha comenzado a procesar el pescado, tiene planes para ello y ya ha iniciado la construcción de una planta procesadora, la cual se encuentra en un 50 % de avance.

Amollo afirma: "Greatlakes Feeds Ltd se compromete a hacer que la acuicultura sea asequible y accesible para todos, incluidos los pequeños acuicultores. La empresa integra la gestión agroindustrial, la capacitación de productores y el empoderamiento comunitario, lo que permite que más de 2.400 mujeres y jóvenes se dediquen a la piscicultura, generen nuevas fuentes de ingresos y fortalezcan la seguridad alimentaria. Al comprar productos agrícolas a las mujeres como materia prima para la producción de piensos, Greatlakes Feeds Ltd les proporciona ingresos a la vez que reduce los costos de los piensos, promoviendo así una mayor adopción de la acuicultura".

Entre sus logros clave destacan la reducción de los costos de producción de piensos para los acuicultores hasta en un 50 %, el aumento del rendimiento de las producciones hasta en un 40 %, la creación de empleo para 94 jóvenes y el empoderamiento de más de 2.000 mujeres que se han convertido en piscicultoras de éxito.

Amollo fue galardonada con el Gran Premio WAYA (Women Agripreneurs of the Year Awards) por parte de AGRA (Alianza



Michelle Mbeo a la derecha. Foto: Peter Changtoek.

para una Revolución Verde en África), en reconocimiento a su labor pionera en este modelo de piensos ecológicos y empoderamiento femenino.

Amollo fue galardonada con el Gran Premio WAYA (Mujeres Agro empresarias del Año) por AGRA (Alianza para una Revolución Verde en África) por ser pionera en este modelo de piensos ecológicos y empoderamiento de las mujeres.

"Además, fui nombrada una de los principales pioneras agroalimentarias por la Fundación del Premio Mundial de la Alimentación y recibí financiación internacional de Asuntos Globales de Canadá", afirma la empresaria. Sin embargo, ha experimentado algunos desafíos en esta aventura.

"El reto de las materias primas, especialmente las fuentes de proteínas, es fundamental para Greatlakes Feeds Ltd, ya que el alimento para peces depende en gran medida de ingredientes con alto contenido proteico. Estos suelen ser escasos, caros o se desvían a los mercados de alimentos para consumo humano, lo que genera inestabilidad en el suministro", afirma la fundadora.

Amollo añade que hay empresas que le han servido de inspiración, entre ellas la Asociación Agropecuaria y Turística El Pasito (ASOPASITO) en Colombia, que apoya a las comunidades indígenas y afrodescendientes a través del cultivo de tilapia y el turismo rural. Al respecto señala: "Demuestran cómo la acuicultura puede impulsar el desarrollo comunitario. Esta organización me inspira porque rompe estereotipos, innova con la tecnología, empodera a las comunidades y prueba que la acuicultura puede ser inclusiva y transformadora. Su historia de éxito demuestra que las mujeres pueden prosperar en todos los aspectos de la acuicultura, desde la producción de piensos y el cultivo en jaulas hasta las piscifactorías y los proyectos marinos."

La acuicultora revela que el costo de funcionamiento de la empresa ronda los 40 millones de chelines kenianos (unas 231.000 libras esterlinas). "La financiación de mi negocio provino de mis ahorros personales, las utilidades retenidas y los préstamos bancarios; actualmente, sigo buscando financiación adicional para ampliar la organización", afirma Amollo.

"Rompí estereotipos desafiando las percepciones culturales y demostrando que las mujeres pueden sobresalir tanto en los aspectos técnicos como comerciales de la acuicultura, desde la producción de alimento hasta el cultivo en jaulas. Tras adquirir experiencia en nutrición de peces, formulación de alimento y prácticas de cultivo sostenibles, gané credibilidad y confianza entre los acuicultores y las partes interesadas. Al mismo tiempo, empoderé a mujeres y jóvenes mediante capacitación y apoyo, generando un efecto multiplicador que demostró que la acuicultura puede ser inclusiva y transformadora para las comunidades. Finalmente, al construir sólidas redes y alianzas con organizaciones, agencias gubernamentales y grupos de productores, obtuve acceso a recursos, mercados y visibilidad que fortalecieron mi negocio y me ayudaron a prosperar en este sector desafiante pero gratificante", afirma.

Amollo afirma que su visión para Greatlakes Feeds Ltd es convertir la acuicultura en un pilar de la seguridad alimentaria, el empoderamiento económico y la sostenibilidad ambiental en África Oriental. «Planeamos expandir nuestras operaciones más allá del lago Victoria, a otras partes de Kenia y países vecinos, facilitando así el acceso a piensos y alevines a precios asequibles para más acuicultores», concluye la empresaria.



Alimentación de los Grandes Lagos. Foto: Peter Changtoek.

Tilapia y otros peces en estanques costeros

Eliana Macharia es otra piscicultora que está demostrando que hay lugar para las mujeres en este sector. Ella cría peces en la región costera de Kenia donde posee varios estanques para peces, tanto revestidos como de hormigón, que utiliza para la cría de peces. Además, cuenta con tanques para tilapia y más de 20 estanques pequeños.

Macharia afirma: "No dependemos de los sistemas de recirculación acuícola (RAS). Nuestros estanques están diseñados de una manera especial para proporcionarnos todos los alevines que necesitamos sin utilizar RAS". "Criamos bagres y tilapias, así como algunas especies de peces ornamentales". La empresa adquirió los primeros alevines en Sagana, en el centro de Kenia, pero también importó ejemplares machos (YY) de los Países Bajos, a través de la empresa Til-Aqua.

Para reducir el costo del alimento, la empresaria comenta que crían larvas de mosca soldado negra para alimentar a los peces, que según ella son ricas en proteínas. Actualmente, la granja tiene capacidad para producir más de 150.000 alevines al mes, los cuales se venden a otros acuicultores en todo el país.

Mientras tanto, Faith Mumo es la fundadora y directora ejecutiva de Iviani Farm, una empresa dedicada a la cría de peces en la árida región oriental de Kenia. Si bien también cultiva frutas como mangos, a los que agrega valor mediante la elaboración de diversos productos para el mercado nacional e internacional, Mumo se ha consolidado como una exitosa piscicultora.

"Utilizamos un sistema de recirculación acuícola (RAS) para la cría de peces", explica la acuicultora, licenciada en Ciencias Pesqueras y Acuícolas, cuya granja está ubicada en Wote, condado de Makueni. En su afán por reducir los costos de producción, esta galardonada piscicultora elabora su propio alimento balanceado. Asimismo, capacita a otros productores y los conecta con los mercados de pescado del país; a ellos les vende tanto ejemplares adultos de tilapia y bagre como alevines para sus propios proyectos en el condado. Aunque en Kenia existe la percepción de que la acuicultura es un campo exclusivo para hombres, estas líderes han demostrado con creces que el sector está abierto para todos.

https://www.fishfarmermagazine.com/features/kenya-sisters-are-doing-it-for-themselves

Sociedad Venezolana
de Acuicultura

POTENCIA ACUÍCOLA

PROMOCIONA TU IDEA, PRODUCTO O SERVICIO JUNTO A NOSOTROS Y NUESTRO GRUPO DE EXPERTOS

Ciclo de webinar

Revista El Acuicultor y Boletín mensual

Página web

Plataformas sociales comunidad digital



LAS ALERTAS FRECUENTES DE IA NO HACEN SEGURAS A LAS GRANJAS ACUÍCOLAS: LA EXPLICABILIDAD Y LA CONFIANZA SON LO PRIMERO

Glen Cho / Director de Tecnología en Aqua Development Ltd.



Las operaciones no cambian en el momento en que la IA dice "riesgo", sino en el momento en que los gerentes entienden "por qué necesitan actuar ahora".

Una alerta de peligro aparece en el dispositivo móvil durante una ronda al amanecer. El sensor de oxígeno disuelto (OD) se encuentra dentro del rango normal y los camarones no muestran signos de mortalidad inmediata. Si las alertas de origen desconocido se repiten, el encargado termina por desactivar las notificaciones. El problema no radica únicamente en la precisión del modelo, sino en que las alertas no se traducen en acciones concretas.

Más alertas no implican un mejor criterio

La Inteligencia Artificial posee la capacidad de identificar con rapidez patrones en la calidad del agua y en registros videográficos que podrían pasar desapercibidos para el ojo humano. No obstante, resulta complejo decidir si se debe reducir la ración de alimento, suplementar oxígeno o recolectar muestras biológicas basándose

exclusivamente en un índice abstracto como «82 % de riesgo de enfermedad». Las revisiones científicas recientes sobre la IA aplicada a la acuicultura constatan que aquellos modelos que demuestran un alto rendimiento en entornos controlados suelen sufrir una degradación en su capacidad predictiva al ser transferidos a diferentes especies, instalaciones o ecosistemas. Por consiguiente, el interés del sector está transitando de los enfoques centrados únicamente en la precisión algorítmica hacia sistemas fiables de soporte para la toma de decisiones.

En este contexto, la Inteligencia Artificial Explicable (XAI) no debe concebirse como una tecnología orientada a revelar la totalidad del entramado interno de una red neuronal. En el trabajo de campo, la XAI se aproxima más a una interfaz operativa que despliega los fundamentos del juicio sintético y su línea temporal; por ejemplo: «Durante los últimos 90 minutos, la tasa de descenso del oxígeno disuelto, la reducción de la actividad nocturna, el retraso en el acceso al alimento y el incremento de la temperatura del agua han elevado conjuntamente el índice de riesgo».

Una buena explicación es una hipótesis verificable, no una causa absoluta

El hecho de que un modelo identifique el oxígeno disuelto (OD) como la variable más relevante no implica que este parámetro sea la causa real de una patología. La importancia de las variables describe únicamente las relaciones estadísticas utilizadas por el algoritmo para formular una predicción, pero no demuestra causalidad. Por lo tanto, la interfaz operativa debe desplegar hipótesis alternativas, indicadores de calidad de los datos y procedimientos de verificación recomendados junto con las variables de soporte.

Una alerta explicable, por ejemplo, puede configurarse bajo la siguiente estructura:

• Observaciones: Incremento reciente en el tiempo de aproximación al alimento y descenso en la actividad de fondo.

• Cambios asociados: Alza en la temperatura del agua, disminución del OD e incremento en la ración de alimentación del día anterior.

• Estado de los datos: Transcurso de 18 días desde la última calibración del sensor de OD y alta turbidez en el registro videográfico.

• Interpretación factible: Posibilidad de estrés por hipoxia o sobrealimentación.

• Acción inmediata: Corroborar parámetros mediante un medidor portátil → Suspender la alimentación → Monitorear durante 30 minutos → Recolectar muestras biológicas si es necesario.

Las investigaciones sobre comportamiento anómalo basadas en visión computacional demuestran el alto potencial de la vigilancia no invasiva; no obstante, resaltan que la integración de datos entre diferentes conjuntos de información, entornos de campo y plataformas múltiples sigue constituyendo un desafío crítico. Por consiguiente, la explicación provista por la IA debe concebirse como un mapa orientativo que delimite la siguiente verificación técnica, en lugar de un diagnóstico definitivo.

Los datos multimodales crean el contexto de la explicación

Al analizar un registro videográfico aislado, la reducción de la actividad puede interpretarse erróneamente como un indicador patológico. Sin embargo, al incorporar los registros correspondientes sobre la hora del día, la temperatura del agua, los ciclos de muda, las tasas de alimentación y las labores de limpieza del personal, dicha anomalía puede revelarse como una fluctuación fisiológica o de manejo completamente normal. Por el

Componente de la alerta	Lo que el operador debería ver	Propósito operacional	Limitación
Nivel de riesgo	Valores actuales y cambio a lo largo del tiempo	Establecer la prioridad de respuesta	La probabilidad no es un diagnóstico
Factores clave	Tendencia de OD, respuesta de alimentación, actividad, temperatura, pH	Entender por qué se activó la alerta	La importancia no demuestra causalidad
Calidad de los datos	Datos faltantes, turbidez, antigüedad de la calibración	Juzgar la confianza	Las reglas de calidad requieren validación local
Explicaciones alternativas	Estrés por oxígeno, sobrealimentación, lectura de sensor variable, muda	Evitar conclusiones prematuras	La lista de opciones puede estar incompleta
Verificación recomendada	Medición cruzada, observar, tomar muestra, aislar	Convertir advertencia en acción	La aprobación humana sigue siendo necesaria
Pista de Auditoría	Versión del modelo, instantánea de datos, acción del operador	Rendición de cuentas y aprendizaje	Añade carga de trabajo de registro

contrario, aun cuando los niveles de oxígeno disuelto (OD) muestren valores normales, si la respuesta al alimento y la distribución espacial de la población se alteran de forma simultánea, la ubicación del sensor podría carecer de representatividad frente al problema real de la unidad de cultivo.

Las revisiones sobre análisis multimodal en el ámbito acuícola concluyen que los métodos individuales basados en video, acústica, texto o sensores fisicoquímicos presentan limitaciones intrínsecas, por lo que la convergencia analítica resulta indispensable para abordar con rigor la calidad del agua, la alimentación, la sanidad y la biomasa. Asimismo, en las investigaciones de cuantificación de biomasa en camarones, la integración de visión computacional y sensores ambientales demostró un potencial superior para generar estimaciones estables en comparación con el análisis de fuentes de datos aisladas. No obstante, persiste la incertidumbre sobre si la reproducibilidad de un estudio experimental aislado puede garantizarse de manera universal en la totalidad de las granjas comerciales.

La confianza en el campo se construye cometiendo errores juntos

Si un modelo nuevo se vincula de inmediato al control automático, a los operadores les costará entender los motivos por los cuales se activaron los equipos. Por eso, primero debe funcionar en modo sombra, emitiendo únicamente alertas para contrastarlas con las observaciones del supervisor. En esta etapa, es fundamental evaluar no solo los aciertos de las alarmas, sino también los falsos positivos y las alertas omitidas. Asimismo, anotaciones de campo como “La reacción de hoy no es la habitual” no deben descartarse como opiniones subjetivas que entorpecen al modelo; al contrario, representan etiquetas de datos esenciales.

Así, la secuencia lógica para una implementación operativa consta de cuatro fases:

1. Recuperación de datos históricos.

2. Alertas en tiempo real sin ejecución de acciones.

3. Recomendaciones sujetas a aprobación humana.

4. Automatización restringida a rangos de seguridad.

Esto demuestra que el valor de la explicabilidad es mucho más crítico en la asistencia para la toma de decisiones guiada por el personal que en un sistema de control completamente automatizado.

La explicación es un registro que mejora los Procedimientos Operativos Estándar (SOP) y la capacitación

Al registrar las alertas y los resultados de las acciones, situaciones como "qué se verificó cuando disminuyó la respuesta a la alimentación tras un aumento en la temperatura del agua" se transforman en conocimiento institucional. Documentar los criterios de los operarios experimentados mediante códigos de motivo y secuencias de trabajo también permite concretar la capacitación del nuevo personal. Por el contrario, si diferentes trabajadores toman medidas distintas ante una misma alerta, es una señal clara de que el Procedimiento Operativo Estándar (SOP) es ambiguo.

Estos registros explicativos también son de gran utilidad para los diversos informes. Mostrar métricas como el tiempo de anticipación de la alerta, el tiempo de verificación, la tasa de aceptación de recomendaciones, los falsos positivos y el tiempo de recuperación tras la acción explica mucho mejor la capacidad operativa que un simple dato aislado sobre la precisión de la IA. Las revisiones recientes sobre la IA en la acuicultura abordan los desafíos de su aplicación en campo, al tiempo que integran el potencial del monitoreo en tiempo real de la calidad del agua y el comportamiento, la optimización del alimento y la vigilancia de enfermedades. Sin embargo, es imposible saber con certeza cuánto mejora la tasa de supervivencia o el Factor de Conversión Alimenticia (FCR) con la introducción de la IA si no se realizan ensayos de control.

La viabilidad económica se calcula en función del cambio de comportamiento, no de la precisión del modelo

Los costos no solo incluyen cámaras, sensores y servidores, sino también la calibración, el etiquetado de datos, el tiempo de verificación del operador y la respuesta a falsas alarmas. Por su parte, los beneficios deben calcularse en función de la reducción del desperdicio de alimento, menores tiempos de anticipación en la detección de riesgos, menos desplazamientos innecesarios del personal y la prevención de paradas en la producción. El retorno de la inversión (ROI) no puede determinarse únicamente a partir de artículos de investigación que demuestren una alta precisión de la IA.

En este sentido, los KPI de campo clave son los siguientes: el tiempo transcurrido desde la alerta hasta la confirmación, la tasa de visualización de las explicaciones, los motivos para aceptar o rechazar las recomendaciones, la frecuencia de falsas alarmas o alertas omitidas, el tiempo de normalización tras una acción y el rendimiento según la versión del modelo. La precisión es solo uno más de ellos.

El futuro a mediano y largo plazo, y las condiciones de implementación en campo

Durante los próximos tres años, existe la posibilidad de que se vuelvan más comunes las alertas que muestran conjuntamente el orden cronológico de los eventos y la calidad de los datos, en lugar de centrarse únicamente en la importancia de las variables (esto es una conjetura). En un horizonte de 5 a 10 años, podría desarrollarse un sistema que recomiende Procedimientos Operativos Estándar (SOP) específicos para cada granja, combinando video, calidad del agua y registros de trabajo, además de indicar automáticamente aquellas situaciones desconocidas para el modelo (esto es una conjetura).

Los requisitos para la implementación en campo son claros. La calibración de sensores, la sincronización de tiempos, la identificación de módulos, los registros operativos, las reuniones de revisión de falsas alarmas, la autoridad de aprobación manual y el retorno a versiones anteriores del modelo (rollback) son lo primero. Las explicaciones de la IA solo tienen sentido cuando se construyen sobre datos de calidad y estructuras sólidas de responsabilidad.

Conclusión: La cuestión es si los humanos pueden actuar, no si la IA tiene razón

La Inteligencia Artificial Explicable no es una máquina que dicta la respuesta correcta. Es más bien como un colega que te muestra las señales que originaron el riesgo, las debilidades en los datos y la siguiente acción a verificar. El objetivo es transformar la experiencia de los gerentes en criterios replicables, sin borrar su conocimiento. Si las alertas no se pueden trasladar de manera efectiva a la operación, incluso un modelo con una precisión altísima terminará siendo ignorado silenciosamente en el campo.

Puede acceder al artículo original a través del siguiente enlace:

https://www.linkedin.com/pulse/frequent-ai-alerts-do-make-fish-farms-safe-trust-come-glen-cho-%EC%A1%B0%EC%9A%A9%EA%B8%B8-ac82c/



LLEVANDO LA BIOSEGURIDAD DE LA CAMARONICULTURA AL SIGUIENTE NIVEL CON IONIZACIÓN DE ALTA ENERGÍA EN POLIQUETOS

Leslie Newmann, Quality Control Manager, Frozen Ocean Feeds LLC.
Jose I. Curiel, CEO, Megasupply Inc.

La bioseguridad en la camaronicultura actual tiene una fisura

La industria camaronera global opera bajo una presión constante: la necesidad de maximizar la producción frente a la amenaza omnipresente de patógenos virales y bacterianos. Desde el WSSV hasta amenazas emergentes como el DIV1, la historia enseña que un solo descuido en la cadena de suministro puede ser catastrófico.

Los poliquetos siguen siendo el estándar de oro nutricional para la maduración, pero también el "Talón de Aquiles" de la bioseguridad. Si bien la industria ha avanzado hacia gusanos "Libres de Patógenos Específicos" (SPF), existe una limitación crítica en este enfoque: el SPF es estadístico, no absoluto. Solo garantiza la ausencia de lo que se busca, dejando la puerta abierta a patógenos desconocidos o mutaciones recientes.

Este artículo presenta un avance tecnológico desarrollado tras años de investigación y perfeccionamiento: La Esterilización de Poliquetos mediante Protocolos Propietarios de Ionización Gamma. Se presenta un análisis de esta tecnología, la cual, calibrada con precisión, logra la esterilidad clínica del alimento sin comprometer su perfil nutricional, vital para la maduración.

El Dilema: Nutrición vs. Riesgo Viral

El desafío histórico ha sido simple: los métodos agresivos que matan virus (como el calor) cocinan al gusano y destruyen sus lípidos. Los métodos suaves (congelación) preservan la nutrición, pero actúan como conservantes para los virus. Esta investigación se centró en encontrar el "Punto de Equilibrio Crítico": la dosis exacta de energía ionizante necesaria para fragmentar irreversiblemente el ADN viral, manteniendo intacta la estructura de los ácidos grasos HUFA y las proteínas (**Tabla 1**).

La Ciencia de la Ionización de Alta Energía

A diferencia de la desinfección química o el lavado con UV (que solo tratan la superficie), la ionización gamma utiliza fotones de alta energía para penetrar profundamente en el tejido congelado. El mecanismo no es químico, es físico. La energía absorbida rompe los enlaces fosfodiéster en las cadenas de ADN y ARN.

Tabla 1. Amenaza a la Bioseguridad por Tipo de Insumo.

Tipo de Poliqueto	Bioseguridad Real	Riesgo Residual	Probabilidad de Introducción de Patógenos (100 años)
Silvestre / Fresco	Nula	Portador activo de carga viral endémica	> 95% (Certeza Virtual)
Congelado (Estándar)	Baja	La congelación preserva el ADN/ARN viral	> 95% (Certeza Virtual)
SPF (Certificado)	Limitada a la lista	Vulnerable a patógenos "No Listados" o emergentes	Media a Alta (Depende del panel de testeo)
Esterilizado (Protocolo Propietario Frozen Ocean)	Absoluta (SAL 10^{-6})	Eliminación física de toda carga biológica	< 0.001% (Negligible)

- El Concepto de "Overkill" (Sobre-eliminación): Nuestro protocolo no busca simplemente reducir la carga bacteriana; aplica una dosis validada para exceder el umbral de supervivencia de los virus más resistentes conocidos en la acuicultura, asegurando una Esterilidad Clínica.
- Protección contra lo Desconocido: Al destruir la maquinaria genética básica necesaria para la replicación de la vida, este proceso es efectivo contra todo tipo de microorganismos (virus, bacterias y hongos), y lo más importante: microbios que la ciencia aún no ha descubierto.

Seguridad y Ausencia de Radiactividad (El Mito vs. La Realidad)

Es fundamental entender que irradiar alimentos NO los hace radiactivos.

- La Fuente: Utilizamos Cobalto-60, que emite Rayos Gamma (fotones de alta energía).
- La Analogía de la Luz: El proceso es exactamente igual a encender una bombilla en una habitación oscura. Los rayos de luz (fotones) iluminan la habitación y eliminan la oscuridad. Cuando se apaga la luz, la habitación no se queda "brillando".
- Sin Residuos: Los rayos gamma pasan a través del producto, depositan su energía para romper el ADN, y desaparecen instantáneamente. No dejan partículas residuales, no crean isótopos radiactivos y no dejan "energía almacenada" en el poliqueto. El producto es seguro para manipular y alimentar inmediatamente después del proceso.

El Secreto Industrial: Preservación Nutricional

El gran obstáculo técnico para aplicar esta tecnología siempre fue la degradación nutricional. Si la dosis es muy baja, los microbios sobreviven. Si es muy alta o mal aplicada, se oxidan los lípidos, afectando su valor nutricional y atractabilidad.

Tras extensas pruebas de laboratorio y ensayos de alimentación, hemos desarrollado un protocolo de Irradiación en Cadena de Frío Controlada. Este método gestiona la termodinámica del proceso, evitando el calentamiento del producto durante la ionización. El resultado es un poliqueto que:

1. Es microbiológicamente inerte (estéril).

Tabla 2. Clasificación de probabilidad en 100 años de riesgos específicos.

Rango	Escenario	Puntaje (1-100)	Probabilidad Estimada	Justificación y Factores de Riesgo
1	Evento de Extinción por Meteorito	1	~0.0001%	Los impactos mayores (escala Chicxulub) ocurren aproximadamente cada 100 millones de años. La probabilidad matemática de que esto ocurra en un siglo específico es infinitesimalmente pequeña (1/1,000,000).
2	Patógenos viables OIE y cualquier otro aun no descubierto en Poliquetos Irradiados con protocolo propietario de Frozen Ocean	1	< 0.001%	La mayoría de los virus se inactivan entre 10–25 kGy. A mayores dosis, el ADN/ARN se fragmenta más allá de cualquier posibilidad de reparación. Aunque el riesgo "cero" es difícil de probar en ciencia, esto es efectivamente una imposibilidad biológica. Nota:
3	Patógenos OIE en Poliquetos congelados o vivos cultivados en Estanques Abiertos (Europa)	25	~15% - 25%	Europa no es endémica para enfermedades tropicales de camarón, y la bioseguridad de la UE es alta. Sin embargo, los estanques abiertos son vulnerables a vectores aviares (heces de aves) y contaminación de la fuente de agua. El riesgo existe, aunque el clima frío es una barrera. A esto hay que sumar el riego del escenario #5.
4	Patógenos OIE en Poliquetos Congelados cosechados o cultivados a cielo abierto en áreas de influencia de camaroneras	95	> 95%	La congelación preserva los virus, no los mata. Prácticamente en casi todas las áreas de cultivo de camarón son endémicos algunos patógenos OIE (como WSSV). Los poliquetos bioacumulan estos virus. Si se cosechan cerca de granjas y solo se congelan, la supervivencia del virus es una certeza virtual
5	Virus Inocuo Muta a Patógeno	99	> 99%	La evolución es constante. Los virus de ARN tienen altas tasas de mutación. En un período de 100 años, la aparición de "nuevos" patógenos derivados de ancestros previamente inofensivos es un proceso biológico estándar (ej. la aparición reciente de DIV1 o EHP)

2. Mantiene la atractabilidad (palatabilidad) para el reproductor.

3. Conserva los perfiles de ácidos grasos esenciales (ARA, EPA, DHA) necesarios para la vitelogénesis.

Análisis Costo-Beneficio: La "Prima de Seguro" Biológico

La siguiente tabla aplica una escala de probabilidad de que ciertos escenarios específicos ocurran dentro de un lapso de 100 años, clasificados de menor riesgo (1) a mayor (100).

El escenario #5 en la tabla anterior es altamente relevante si se toma en cuenta una realidad que no es conocida ampliamente: La concentración de virus en el agua de mar es astronómica (**Tabla 3**). Este es un dato científico contundente que refuerza enormemente el argumento sobre la necesidad de la esterilización.

- En una gota de agua: Hay cientos de miles de virus.
- En una cucharadita: Hay más virus que humanos en el planeta Tierra.

Esto refuerza que la probabilidad de que un virus inocuo al camarón mute a patógeno dentro de un periodo de 100 años es prácticamente del 100%.

Los poliquetos cultivados o cosechados en el medio natural ingieren sedimentos que contienen hasta mil millones (109) de partículas virales por gramo. Sin una esterilización física por ionización, es imposible garantizar que esa carga viral no contenga patógenos emergentes.

Disociación entre Detección Molecular y Viabilidad Viral

El Mecanismo de la Confusión: La PCR amplifica segmentos cortos de ADN/ARN (amplicones). Si la radiación rompe la cadena viral en múltiples puntos, pero deja intacto el segmento pequeño (de 100-200 pares de bases) que buscan los primers de la PCR, la prueba arrojará un resultado "Positivo".

Sin embargo, para que un virus tenga caracter infectivo (viable), necesita que su genoma completo (miles de pares de bases) esté intacto para secuestrar la célula hospedadora y poder replicarse (Tabla 4).

- Estado del Virus: Inactivado / No Viable
- Estado del Genoma: Fragmentado / No Funcional
- Diagnóstico: PCR Positivo (Detección de remanentes genéticos)
- Riesgo Real: Nulo

La implementación de poliquetos

Tabla 3. Concentración media aceptada científicamente de VLPs - (Partículas semejantes a Virus) en el ambiente marino.

Ubicación	Concentración de VLPs
Columna de agua (océano abierto)	10^6 a 10^7 por ml
Aguas costeras (cerca de granjas)	10^7 a 10^8 por ml
Sedimento marino (lodo)	10^8 a 10^9 por gramo

Tabla 4. Diferencia entre Detección PCR y Riesgo de Infección.

Escenario	Estado del Virus	Integridad del ADN/ARN	Resultado PCR	Capacidad de Infectar (Viabilidad)	¿Es Seguro?
Poliqueto Fresco Infectado	Vivo / Intacto	Cadena Completa	Positivo	SÍ (Alta)	NO
Poliqueto Congelado	Preservado / Latente	Cadena Completa	Positivo	SÍ (Alta)	NO
Poliqueto Irradiado Congelado (Protocolo Frozen Ocean)	Muerto / Inactivado	Fragmentado y/o Destruido	Positivo (Detecta fragmentos)	NO (Nula)	SÍ

esterilizados bajo este protocolo conlleva una prima sobre el precio del poliqueto commodity. Sin embargo, en la gestión moderna de riesgos, esto no debe verse como un costo de insumo (OPEX), sino como una inversión en seguridad (Risk Management).

El valor de la tranquilidad para un laboratorio (hatchery) que produce cientos de millones de postlarvas, el costo de un brote viral introducido por alimento fresco supera por un factor de 100 a 1 el costo anual de utilizar alimento esterilizado. Es la diferencia entre jugar a la ruleta rusa y tener un sistema blindado.

Conclusión

La industria de la acuicultura está evolucionando. Ya no es suficiente confiar en certificados de salud que nos dicen que un animal "parece sano". En un entorno globalizado con patógenos en constante mutación, la única seguridad real proviene de la física, no de la biología.

La aplicación de Protocolos Propietarios de Ionización de Alta Energía en poliquetos representa el pinác*ulo de la bioseguridad alimentaria: un producto que ofrece la potencia nutricional de la naturaleza, con la seguridad clínica de un laboratorio. Es, en definitiva, la póliza de seguro más efectiva para el activo más valioso de una granja: sus reproductores.

Frozen Ocean Feeds LLC [www.FrozenOceanFeeds.com] y Megasupply Inc. [www.Megasupply.net]: Liderando la bioseguridad acuícola a través de la innovación tecnológica.

Tabla 5. La Economía de la Prevención

Factor	Poliquetes Congelados/SPF Estándar	Poliquetes Esterilizados (Protocolo Propietario)
Costo Directo	Base. Solo costo de cosecha y frío	Premium. Incluye proceso tecnológico avanzado y logística nuclear
Garantía	Estadística. Basada en muestreo (PCR)	Física. Basada en leyes de la física (dosimetría)
Exposición al Riesgo	Variable. Un "falso negativo" en un test PCR puede costar la granja	Cero. El vector de alimento se elimina de la ecuación
Impacto Financiero	Riesgo de pérdida total + Costos de limpieza + Daño reputacional	Costo predecible y fijo

Sociedad Venezolana de Acuicultura

UN ESPACIO

DE INTERACCIÓN MUTUA

CRECE JUNTO A LA SVA

www.svacuicultura.org



Sociedad Venezolana
de Acuicultura

IMAGEN DE PORTADA
Y CONTRAPORTADA
Álvaro Cuartas



Cosechando macroalgas,
***Kappaphycus alvarezii*.**

www.svacuicultura.org

@svacuicultura

Sociedad Venezolana de Acuicultura