

Revaluation of aquaculture waste and by-products under a circular economy approach: systematic literature review

Coronado Guerrero, Renzo Gabiel¹ ; Márquez Sandoval, Carlos Alfonso² 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21221663@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20229076@utp.edu.pe

Abstract– Aquaculture has surpassed extractive fishing in global production, consolidating its position as a key sector for food security. However, this growth has increased the generation of solid and liquid waste, and by-products, whose inadequate management generates significant environmental impacts. This systematic literature review (SLR) analyzes current and emerging methods for revaluing aquaculture waste using a circular economy approach. Thirty scientific articles indexed in Scopus and Web of Science, published between 2020 and 2025, were examined. The methodology was structured using the PICO and PRISMA strategies, allowing for a rigorous and categorized selection. The findings show that the most common waste products include viscera, scales, shells, sludge, and effluents. Notable techniques include enzymatic hydrolysis, anaerobic digestion, aquaponics, multi-trophic systems (MTS), and ecological extraction processes. These allow for the recovery of compounds such as collagen, peptides, biogas, and biofertilizers. Unlike traditional methods, these technologies valorize waste as a productive input, reducing pollution and generating high-value-added products. Despite their benefits, many of these methodologies are still in the experimental phase, facing economic, technological, and regulatory limitations. The conclusion is that the implementation of these solutions can transform aquaculture waste into strategic resources, contributing to environmental sustainability, economic efficiency, and productive innovation in the sector.

Keywords– aquaculture, waste, by-products, revaluation, methods.

Revalorización de residuos y subproductos acuícolas bajo enfoque de economía circular: revisión sistemática de literatura

Coronado Guerrero, Renzo Gabiel¹ ; Márquez Sandoval, Carlos Alfonso² 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21221663@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20229076@utp.edu.pe

Resumen– La acuicultura ha superado a la pesca extractiva en producción mundial, consolidándose como un sector clave en la seguridad alimentaria. Sin embargo, este crecimiento ha incrementado la generación de residuos sólidos, líquidos y subproductos, cuya gestión inadecuada genera impactos ambientales significativos. Esta revisión sistemática de literatura (RSL) analiza métodos actuales y emergentes de revalorización de residuos acuícolas bajo un enfoque de economía circular. Se examinaron 30 artículos científicos indexados en Scopus y Web of Science, publicados entre 2020 y 2025. La metodología se estructuró bajo las estrategias PICO y PRISMA, permitiendo una selección rigurosa y categorizada. Los hallazgos muestran que los residuos más comunes incluyen vísceras, escamas, caparazones, lodos y efluentes. Entre las técnicas destacadas se encuentran la hidrólisis enzimática, digestión anaeróbica, acuaponía, sistemas multitróficos (IMTA) y procesos de extracción ecológica. Estas permiten recuperar compuestos como colágeno, péptidos, biogás y biofertilizantes. A diferencia de los métodos tradicionales, estas tecnologías valorizan el residuo como insumo productivo, reduciendo la contaminación y generando productos de alto valor añadido. Pese a sus beneficios, muchas de estas metodologías aún se encuentran en fase experimental, enfrentando limitaciones económicas, tecnológicas y normativas. Se concluye que la implementación de estas soluciones puede transformar los residuos acuícolas en recursos estratégicos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental, eficiencia económica e innovación productiva del sector.

Palabras clave-- acuicultura, residuos, subproductos, revalorización, métodos

I. INTRODUCCIÓN

En años recientes, la acuicultura ha tomado un papel cada vez más importante dentro del sector pesquero a escala mundial. [1] Esta evolución se hizo evidente en 2022, cuando la acuicultura logró un máximo histórico de 94.4 millones de toneladas de producción de animales acuáticos, superando por primera vez a la pesca extractiva. Este volumen representó el 51% de la producción global total y el 57% de lo destinado al consumo humano. Sin embargo, este crecimiento ha estado acompañado por un incremento proporcional en la generación de residuos y subproductos provenientes de esta industria. [2] Para mayor entendimiento se define como residuo a toda sustancia u objeto que su propietario decide desechar; y como subproducto a todas aquellas sustancias u objetos generados de forma secundaria durante un proceso principal de producción, que pueden ser utilizados directamente sin requerir tratamientos adicionales, mientras que estos cumplan con la normativa legal vigente. En el caso de la acuicultura, [2] el subproducto

principal proviene del procesamiento de la biomasa, como cabezas, esqueletos, vísceras y conchas. Por otro lado, [3] los residuos se clasifican en sólidos, líquidos y químicos. Los residuos sólidos comprenden heces de los animales cultivados, alimento no consumido, animales muertos durante el proceso de cultivo y partículas en suspensión. Los residuos líquidos incluyen compuestos orgánicos disueltos, como amoníaco, nitrito, nitrato y fósforo, resultantes de los procesos metabólicos de los organismos acuáticos. Por último, los residuos químicos provienen del uso de medicamentos, antibióticos y desinfectantes empleados para prevenir y tratar enfermedades en los cultivos acuícolas. Todo esto, puede provocar un impacto ambiental negativo como puede ser la contaminación de aguas por eutrofización, [4] la cual es una contaminación del agua debido a altas concentraciones de fósforo y nitrógeno, siendo este un efluente de la industria acuícola. [5] Además, el procesamiento del pescado posterior al cultivo genera una elevada cantidad de subproductos, los cuales pueden representar entre el 20 % y el 70 % del peso total del pescado, dependiendo de la especie y del tipo de procesamiento. Esta situación pone en evidencia la importancia de revalorizar dichos subproductos y residuos como una estrategia clave para mejorar tanto la eficiencia económica como el desempeño ambiental de la actividad acuícola. No obstante, a pesar de su potencial, actualmente se reconocen pocos métodos aplicados para la valorización efectiva de estos subproductos. En este contexto, surge un creciente interés por investigar enfoques innovadores, [6] Un ejemplo de innovación en la valorización de subproductos acuícolas es el uso de escamas de pescado para la obtención de fibras de *Umorfil*, las cuales presentan propiedades antibacterianas y de control de olores, lo que las convierte en una alternativa viable para su aplicación en la industria textil. Ante este panorama, se justifica la necesidad de una Revisión Sistemática de Literatura que compile y analice críticamente la evidencia sobre la revalorización de residuos y subproductos en la industria acuícola bajo el enfoque de economía circular, aportando insumos útiles para nuevas investigaciones, la formulación de políticas y aportar a la transformación productiva del sector.

II. METODOLOGÍA

A. Estrategia de Búsqueda

La acuicultura es un proceso industrial orientado al cultivo de organismos acuáticos, incluyendo microorganismos, así como especies de flora y fauna marina, en ambientes de agua

dulce o salada, con fines alimentarios u otros usos. En los últimos años, esta industria ha cobrado creciente relevancia como respuesta a la necesidad de garantizar el suministro alimentario frente al aumento sostenido de la población mundial. Este crecimiento ha conllevado, no obstante, un incremento significativo en la generación de residuos y subproductos. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo identificar y compilar métodos orientados a la revalorización de dichos residuos y subproductos, con el propósito de contribuir a una mayor sostenibilidad del sector. Para el desarrollo del estudio, se aplicó la estrategia de búsqueda PICO, la cual permitió ubicar y analizar la literatura científica relevante vinculada a la temática abordada.

Tabla 1. Componentes de estrategia Pico

P Problema	I Intervención	C Comparación	O Resultado
Residuos y subproductos de la industria acuícola	Métodos de revalorización de residuos y subproductos de la industria acuícola	Prácticas convencionales de manejo de residuos y subproductos	Mejora en sostenibilidad de la acuicultura
P1: ¿Qué métodos innovadores son más eficientes que los tradicionales en la revalorización de residuos y subproductos acuícolas?"			
P11: ¿Cuáles son los principales residuos y subproductos del cultivo y producción en la industria acuícola?			
P12: ¿Qué métodos de revalorización de residuos y subproductos han sido propuestas y aplicadas?			
P13: ¿Qué diferencias clave existen entre los métodos tradicionales y los métodos de revalorización de residuos acuícolas?			
P14: ¿Qué métodos de revalorización muestran mayor potencial de adopción en la industria acuícola?			

B. Ecuaciones de Búsqueda

La aplicación de esta estrategia nos permitió recopilar datos en distintas bases de forma más eficiente, ya que facilitó la identificación precisa de palabras clave. Esto nos permitió identificar y seleccionar artículos estrechamente relacionados con el tema abordado en esta RSL. A continuación, se presentan los criterios utilizados para la búsqueda:

Tabla 2. Ecuación de búsqueda

Componente pico	Términos	Ecuación de búsqueda
P (Problema)	Acuicultura, residuos de acuicultura, subproducto de la acuicultura, residuos de pescado, industria pesquera, subproducto de pescado, piscicultura	"aquaculture" OR "aquaculture waste" OR "aquaculture by-product" OR "fish waste" OR "fishing industry" OR "Fish by-product" OR "Fish farming"
I (Intervención)	Reutilización, valorización, recuperación de residuos, reducción de residuos, gestión de residuos, manejo de residuos, harina de pescado, compostaje, biogás	"reuse" OR "valorization" OR "waste recovery" OR "Waste reduction" OR "Waste management" OR "Waste handling" OR "fishmeal" OR "composting" OR "biogas"
C (Comparación)	Vertedero, efluentes, residuos,	"landfill" OR "effluents"

	subproducto, sedimentación"	"waste" OR "by-product" OR "Sedimentation"
O (Resultados)	Economía circular, Acuicultura sostenible, Eficiencia de los recursos	"circular economy" OR "sustainable aquaculture" OR "Resource efficiency"
Ecuación general de búsqueda		
("aquaculture" OR "aquaculture waste" OR "aquaculture by-product" OR "fish waste" OR "fishing industry" OR "Fish by-product" OR "Fish farming") and ("reuse" OR "valorization" OR "waste recovery" OR "Waste reduction" OR "Waste management" OR "Waste handling" OR "fishmeal" OR "composting" OR "biogas") and ("landfill" OR "effluents" OR "waste" OR "by-product" OR "Sedimentation") and ("circular economy" OR "sustainable aquaculture" OR "Resource efficiency")		

C. Criterios (Inclusión y Exclusión)

Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión

CI	CE
CI1: Fecha de publicación 2020 a 2025	CE1: Estudios que aborden únicamente eliminación o tratamiento de residuos sin procesos de revalorización o recuperación de valor.
CI2: Incluir únicamente artículos originales y no duplicados.	CE2: Estudios centrados en residuos de otras industrias que no se apliquen específicamente al sector acuícola.
CI3: Documentos de acceso abierto.	CE3: Estudios centrados exclusivamente en el uso de residuos de otras industrias como insumo para la acuicultura
CI4: Estudios enfocados en aplicación de economía circular en la industria acuícola	CE4: Investigaciones enfocadas en temas económicos, sociales o normativos generales del sector acuícola sin análisis técnico de métodos de revalorización.
CI5: Artículos que utilicen metodología científica clara.	
CI6: Artículos revisados por pares (peer-reviewed) o publicados en revistas científicas indexadas.	

D. Proceso de Selección de estudios

Durante la fase de selección, se aplicó la estrategia PRISMA, la cual facilitó la recopilación de información relevante sobre la revalorización de residuos y subproductos de la industria acuícola. Esta estrategia permitió analizar tanto la implementación de nuevos métodos y métodos tradicionales.

En esta RSL, el enfoque PRISMA se evidenció desde la definición de los criterios de inclusión y exclusión hasta la selección final de los estudios. Para ello, se utilizaron las palabras clave y la ecuación de búsqueda derivadas de la estrategia PICO, lo que resultó en un total de 27 artículos incluidos en la presente revisión.

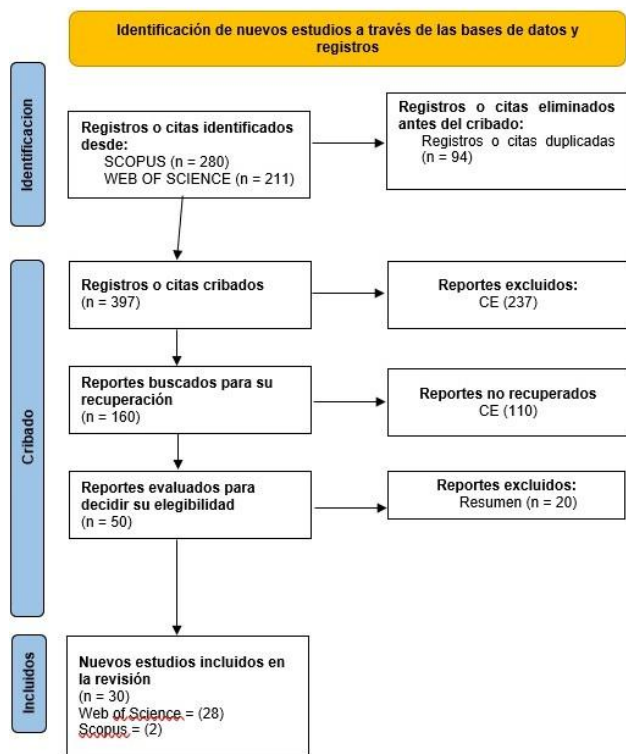


Gráfico 1. Diagrama prisma

III. RESULTADOS

Resultados bibliométricos

Al comienzo del estudio, se llevó a cabo un análisis bibliométrico de cada una de las investigaciones considerados en la revisión sistemática de literatura. La Tabla IV presenta un resumen de la información obtenida, incluyendo los nombres de los autores, los títulos de los artículos y el año en que fueron publicados.

Tabla 4. Artículos considerados para la revision

TITULO	AUTOR
A circular economy framework for seafood waste valorisation to meet challenges and opportunities for intensive production and sustainability	Cooney R, de Sousa D, Fernández-Ríos A, Mellett S, Rowan N, Morse A, Hayes M, Laso J, Regueiro L, Wan A, Clifford E
A method for the process of collagen modified polyester from fish scales waste	Hou E, Huang C, Lee Y, Han Y, Chu H
Achieving a Biocircular Economy in the Aquaculture Sector Through Waste Valorization	Kurniawan S, Ahmad A, Imron M, Abdullah S, Othman A, Hasan H
Aquaculture—Production System and Waste Management for Agriculture Fertilization—A Review	Chiquito-Contreras R, Hernandez-Adame L, Alvarado-Castillo G, Martinez-Hernández M, Sanchez-Viveros G, Chiquito-Contreras C, Hernandez-Montiel L
Bioactive compounds of nutraceutical value from fishery and aquaculture discards	Mutalipassi M, Esposito R, Ruocco N, Viel T, Costantini M, Zupo V

Circular economy in aquaculture: An Italian survey to understand perceptions, challenges and options for transition	Cozzolino M, Salomone R, Ricca B, Gulotta T
Distribution of phosphorus forms depends on compost source material	Lanno M, Kriipsalu M, Shanskiy M, Silm M, Kisand A
Diving into Fish Valorisation: Review Opportunities and Analyzing Azorean Fish Data	Valério N, Soares M, Vilarinho C, Correia M, Carvalho J
Efficient treatment of high-salinity aquaculture effluents through synergistic membrane distillation and VUV/UVC photolysis	Ma X, Flanjak L, Chen X, Morgante C, Kirkebaek B, Boffa V, Quist-Jensen C, Ali A, Maurino V, Roslev P
Environmental and economic life cycle evaluation of potential energy efficiency measures on Latvian fish supply chain	Diaz F, Koiro L, Romagnoli F
Evaluating the Liming Potential of <i>Mytilus galloprovincialis</i> Shell Waste on Acidic Soils	Lolas A, Molla K, Georgiou K, Apostologamvrou C, Petrotou A, Skordas K, Vafidis D*
Fish By-Product Valorization as Source of Bioactive Compounds for Food Enrichment: Characterization, Suitability and Shelf Life	Honrado A, Rubio S, Beltran J, Calanche J
Fish Viscera Hydrolysates and Their Use as Biostimulants for Plants as an Approach towards a Circular Economy in Europe: A Review	Dominguez H, Iñarra B, Labidi J, Bald C
Fish Waste: From Problem to Valuable Resource	Coppola D, Lauritano C, Esposito F, Riccio G, Rizzo C, de Pascale D
Fishmeal replacement by periphyton reduces the fish in fish out ratio and alimentation cost in gilthead sea bream <i>Sparus aurata</i>	Savonitto G, Barkan R, Harpaz S, Neori A, Chernova H, Terlizzi A, Guttman L
Nutrient recovery and recycling from fishery waste and by-products	Zhang J, Akyol C, Meers E
Recent Applications of Biopolymers Derived from Fish Industry Waste in Food Packaging	Lionetto F, Esposito Corcione C
Simultaneous biomethane production and nutrient remineralization from aquaculture solids	Lobanov V, De Vrieze J, Joyce A
Solar-Dried Biofertilizers from Marine Waste: Enhancing the Circular Economy	Castillo Téllez B, Castillo Téllez M, Martín del Campo M, Zamora González E, Domínguez Niño A, Mejía Pérez G
Sustainable Management of Shrimp Waste to Produce High-Added Value Carbonaceous Adsorbents	Fotodimas I, Ioannou Z, Kanlis G, Sarris D, Athanasekou C
Sustainable production of biofuels and bioderivatives from aquaculture and marine waste	Alvarado-Ramírez L, Santiesteban-Romero B, Poss G, Sosa-Hernández J, Iqbal H, Parra-Saldivar R, Bonaccorso A, Melchor-Martínez E
The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development	Ogello E, Outa N, Obiero K, Kyule D, Munguti J
Towards the anchovy biorefinery: Biogas production from anchovy processing waste after fish oil extraction with biobased limonene	Paone E, Fazzino F, Pizzone D, Scurria A, Pagliaro M, Ciriminna R, Calabrò P
Towards zero waste: Sustainable waste management in aquaculture	Yildiz H, Pulatsü S

Trash to Treasure: An Up-to-Date Understanding of the Valorization of Seafood By-Products, Targeting the Major Bioactive Compounds	Roy V, Islam M, Sadia S, Yeasmin M, Park J, Lee H Chun B
Trends and Opportunities of Bivalve Shells' Waste Valorization in a Prospect of Circular Blue Bioeconomy	Summa D, Lanzoni M, Castaldelli G, Fano E, Tamburini E
Turning Waste into A Resource: Isolation and Characterization of High-Quality Collagen and Oils from Atlantic Bluefin Tuna Discards	Cutajar N, Lia F, Deidun A, Galdies J, Arizza V, Zammit Mangion M
Unlocking the Potential of Marine Sidestreams in the Blue Economy: Lessons Learned from the EcoFISHent Project on Fish Collagen	Dondero L, De Negri Atanasio G, Tardanico F, Lertora E, Boggia R, Capra V, Cometto A, Costamagna M, Feletti M, Garibaldi F, Grasso F, Jenssen M, Lanteri L, Lian K, Monti M, Perucca M, Pinto C, Poncini I, Robino F, Rombi J, Ahsan S, Shirmohammadi N
Upcycled aquaculture waste as textile ingredient for promoting circular economy	Hou E, Huang C, Lee Y, Chu H
Zero-Waste Food Production System Supporting the Synergic Interaction between Aquaculture and Horticulture	Nenciu F, Voicea I, Cocarta D, Vladut V, Matache M, Arsenoaia V

Con el propósito de facilitar una mejor comprensión de la literatura revisada, se realizó una categorización de los 30 artículos seleccionados. Esta organización permitió identificar patrones dentro de las investigaciones, tales como la prevalencia de ciertos idiomas, países de procedencia y los años con mayor producción científica relacionada con la revalorización de residuos y subproductos en la industria acuícola.

El gráfico presentado muestra el porcentaje de artículos publicados, resaltando el predominio del idioma inglés como principal medio de difusión de estudios en este campo, lo cual refleja una tendencia global en la producción científica vinculada a la sostenibilidad y aprovechamiento de recursos en la acuicultura.



Gráfico 2: Clasificación de los artículos científicos según idioma de publicación

El siguiente gráfico categoriza cada artículo según el país en el que se llevó a cabo la investigación. Este análisis permite visualizar cuáles son los países más activos en la producción

científica relacionada con la revalorización de residuos y subproductos generados por la industria acuícola.

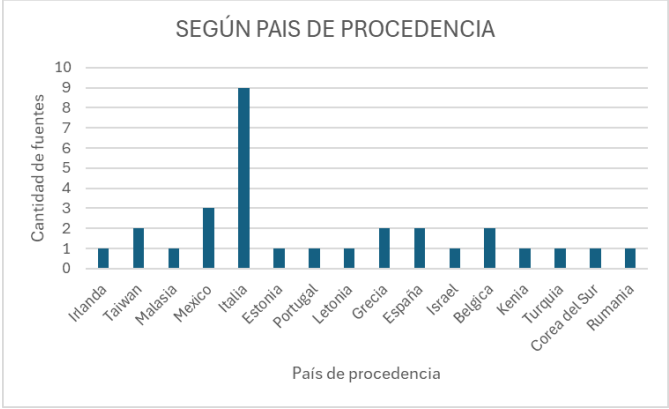


Gráfico 3: Clasificación de los artículos científicos según lugar de procedencia

Este gráfico clasifica los artículos según su año de publicación, lo que permite observar la evolución del interés académico en la revalorización de residuos y subproductos de la industria acuícola a lo largo del tiempo.

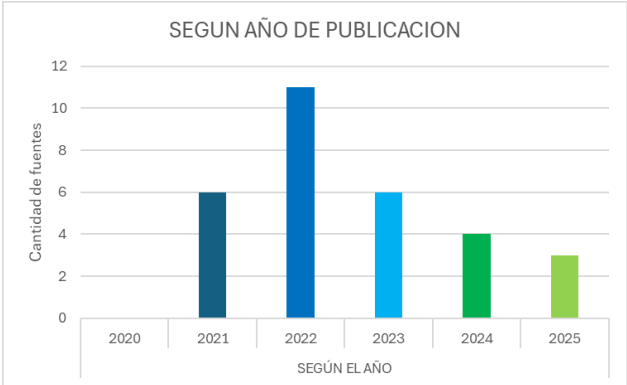


Gráfico 4: Clasificación de los artículos científicos según año de publicación

A continuación, se presenta la clasificación de los artículos según la base de datos de la que fueron extraídos, en este caso únicamente Scopus y Web of Science. Esta categorización permite visualizar la distribución de las fuentes utilizadas y evaluar la fiabilidad y alcance de la información recopilada, considerando la relevancia y prestigio de ambas bases de datos en el ámbito científico.

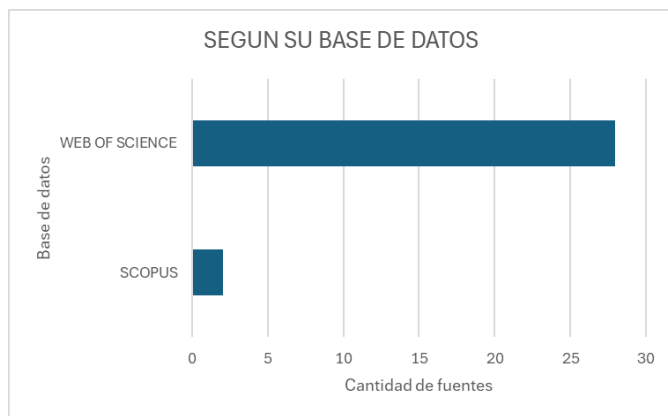


Gráfico 5: clasificación de los artículos científicos según base de datos.

Finalmente, se identificaron los autores y estudios más citados dentro de la Revisión Sistemática de Literatura (RSL), lo que permite reconocer aquellos trabajos con mayor impacto en la valorización de residuos y subproductos acuícolas. La siguiente tabla presenta los cinco artículos más mencionados y su frecuencia de aparición.

Tabla 5. Principales fuentes según número de citas

Autores	Nombre del artículo	Veces mencionada
Zhang et al.	Simultaneous biomethane production and nutrient remineralization from aquaculture solids	7
Chiquito-Contreras et al.	Nutrient recovery and recycling from fishery waste and by-products	5
Lobanov et al.	Towards the anchovy biorefinery: Biogas production from anchovy processing waste	5
Lionetto & Corcione	Upcycled aquaculture waste as textile ingredient for promoting circular economy	5
Roy et al.	Diving into Fish Valorisation: Azorean Fish Data	5

E. Resultados por contenido:

A continuación, se exponen los hallazgos derivados del análisis de los estudios seleccionados para la presente Revisión Sistemática de Literatura (RSL). La información recopilada ha sido organizada en función de las preguntas de investigación formuladas previamente, con el fin de abordar de manera clara y estructurada los distintos aspectos relacionados con la generación, gestión y revalorización de residuos y subproductos en la industria acuícola. Esta disposición temática permite una lectura coherente de los resultados, facilitando la identificación de patrones, enfoques metodológicos y oportunidades de mejora en la gestión sostenible de estos materiales.

¿Cuáles son los principales residuos y subproductos del cultivo y producción en la industria acuícola?

La actividad acuícola genera diversos residuos y subproductos, tanto sólidos como líquidos, que deben ser considerados en cualquier estrategia de sostenibilidad. Uno de los residuos más relevantes son las aguas residuales, las cuales se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P). Actualmente, estas aguas suelen ser filtradas o tratadas de manera básica antes

de ser vertidas como efluentes en cuerpos de agua externos. Sin embargo, si no se gestionan adecuadamente, estos compuestos pueden causar efectos ambientales como eutrofización, pérdida de biodiversidad y deterioro de la calidad del agua [7], [8].

Asimismo, se generan grandes volúmenes de lodos de pescado, compuestos por heces, alimento no consumido, biomasa muerta y otras materias orgánicas. Este residuo es inherente a los sistemas de producción acuícola y su mal manejo puede derivar en emisiones de gases, proliferación de microorganismos patógenos y contaminación de los cuerpos de agua cercanos [9]. Debido a esto actualmente se aplican sistemas como los de recirculación (RAS), donde estos sólidos son separados mediante procesos mecánicos o químicos, y pueden ser aprovechados en digestión anaeróbica o aplicados directamente en suelos agrícolas [10].

Durante el procesamiento del pescado en instalaciones acuícolas, se generan subproductos sólidos como cabezas, espinas, pieles, vísceras, escamas y colas, que pueden representar entre el 50 % y el 75 % del peso original del animal dependiendo de la especie. Estos materiales son frecuentemente descartados o incinerados, generando consecuencias negativas de tipo ambiental, sanitario y económico [11], [12]. Un residuo especialmente problemático es el de las escamas de pescado, que por su composición no pueden reutilizarse fácilmente y, si se disponen de forma inadecuada, pueden causar acidificación del suelo [13].

En el cultivo de crustáceos como el camarón, los residuos predominantes son cabezas y caparazones, que constituyen entre el 45 % y el 60 % del peso del animal, y que muchas veces se vierten directamente al medio ambiente [14].

Aunque parte de estos residuos se revalorizan mediante su uso en alimentación animal, fertilizantes o la obtención de ingredientes de valor agregado, una gran proporción sigue siendo desaprovechada. Esto subraya la necesidad de incorporar enfoques más circulares en la gestión de residuos acuícolas para mitigar su impacto ambiental y mejorar la eficiencia de los sistemas productivos [15], [16].

Tabla 6. Cantidad según el tipo de Residuo o Subproducto

Según el tipo de Residuo o Subproducto	
Subproductos de procesamiento de Pescado	19
Subproductos de crustáceos	4
Efluentes acuícolas	7
Lodos	8
Subproductos de moluscos	2
Residuos de concha de <i>Mytilus galloprovincialis</i>	1
Biomasa de perifiton (de biofiltro)	1
Desechos de algas marinas	1
Escamas de pescado	1

¿Qué métodos de revalorización de residuos y subproductos han sido propuestos y aplicados?

Diversos métodos de revalorización han sido propuestos y aplicados en la industria acuícola, dependiendo del tipo de residuo o subproducto tratado. En el caso de vísceras, cabezas, pieles y espinas, se ha recurrido extensamente a la hidrólisis enzimática para la obtención de hidrolizados de proteínas y péptidos bioactivos, debido a su eficiencia, especificidad y bajo impacto ambiental [17], [18], [19]. También se ha utilizado la

extracción ácida y enzimática para obtener colágeno y gelatina, con técnicas como la extracción con pepsina o métodos asistidos por ultrasonido, presión o disolventes verdes, optimizando el rendimiento y calidad de los extractos [18], [20], [21].

Por otro lado, los caparazones de crustáceos como camarones, langostinos o cangrejos han sido empleados para la producción de quitina y quitosano, así como para la obtención de materiales carbonosos mediante pirólisis, los cuales son útiles en aplicaciones ambientales y energéticas [22], [23], [14]. Estos residuos también se utilizan como catalizadores en la producción de biodiésel o como bioadsorbentes en el tratamiento de aguas [24], [16], [12]. [9]

Las escamas de pescado, ricas en colágeno, han sido transformadas en materiales innovadores como biopolímeros y textiles funcionales, a través de procesos de extracción de péptidos colagénicos y modificación supramolecular, con aplicaciones en la industria textil y de envases [25], [13], [26].

En cuanto a los lodos acuícolas y sólidos sedimentados, estos se han valorizado principalmente mediante digestión anaeróbica para la producción de biogás, así como en la elaboración de biofertilizantes por compostaje o secado solar [10], [27], [28]. La aplicación de estos residuos en suelos agrícolas permite mejorar su fertilidad, reducir la acidez y promover el reciclaje de nutrientes como nitrógeno y fósforo [23], [9], [29].

Las aguas residuales provenientes de sistemas acuícolas han sido tratadas con tecnologías como humedales artificiales, biofloc, sistemas multitróficos integrados (IMTA) y acuaponía, que integran especies vegetales y microorganismos para remover nutrientes disueltos, metales pesados y materia orgánica, al tiempo que generan productos de valor añadido como biomasa vegetal o alimento natural para peces [7], [8] [30].

Por último, los residuos mixtos del procesamiento del pescado, incluyendo mezclas de vísceras, piel, escamas, espinas y aletas, han sido aprovechados en biorrefinerías acuícolas para producir biocombustibles (biodiésel, biohidrógeno, biogás) mediante rutas como transesterificación, pirólisis y digestión anaeróbica, así como para obtener compuestos funcionales a través de procesos de extracción enzimática o química [16], [9] [12].

Tabla 7. Cantidad de técnicas y métodos según categoría

Cantidad de técnicas y métodos según categoría	
Biotechnología Aplicada	4
Tecnologías de Extracción y Procesamiento Avanzado	8
Valorización Energética	6
Métodos Naturales y Agroecológicos	5
Sistemas Integrados y Circulares	2

P13: ¿Qué diferencias clave existen entre los métodos tradicionales y los métodos de revalorización de residuos acuícolas?

Los métodos tradicionales de tratamiento de residuos acuícolas han estado centrados, principalmente, en el vertido directo al ambiente, la aplicación terrestre de lodos y el compostaje simple. Estas prácticas, aunque de implementación sencilla y económica, presentan múltiples desventajas. Por ejemplo, la aplicación en campo de lodos con alto contenido de humedad ($\geq 99,76\%$) implica elevados costos operativos, una pérdida considerable de nutrientes, y riesgos ambientales como la contaminación accidental de suelos y cuerpos de agua [27]. Además, durante el compostaje tradicional se producen emisiones de compuestos volátiles (C, N y S), lo que conlleva pérdida de nutrientes y potencial contaminación atmosférica [9].

Otra limitación importante de los métodos convencionales es la calidad inconsistente de los lodos crudos, el posible contenido de toxinas y metales pesados, así como la presencia de olores desagradables, lo cual dificulta su aceptación social y comercial [7], [17], [9]. Asimismo, la eficiencia de fertilización de estos residuos es reducida, ya que parte del fósforo queda fijado a metales como Fe o Al, volviéndolo menos disponible para las plantas [31].

En contraste, los métodos modernos de revalorización persiguen integrar los residuos acuícolas en cadenas de valor mediante tecnologías que permiten recuperar compuestos útiles como péptidos, proteínas, colágeno, lípidos y biofertilizantes. Por ejemplo, la hidrólisis enzimática, ampliamente aplicada a subproductos de pescado, permite obtener proteínas funcionales y péptidos bioactivos sin emplear disolventes tóxicos [32]. Este método ofrece ventajas sustanciales frente a procesos químicos, que si bien son más rápidos, tienden a contaminar el producto final y reducir su pureza [33]. No obstante, el uso de enzimas implica altos costos y un aumento significativo del gasto energético en etapas como la agitación, centrifugación y liofilización [20], [16].

Asimismo, tecnologías como la extracción con dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂) o el uso de agua subcrítica han sido propuestas como métodos ecológicos y altamente selectivos para la obtención de lípidos y otros compuestos bioactivos [32]. Estos métodos evitan la utilización de solventes contaminantes, pero requieren equipamientos costosos y conocimientos técnicos avanzados que limitan su escalabilidad, especialmente en países con menor desarrollo tecnológico [29], [10].

Los métodos biológicos modernos también presentan desafíos. En el caso de la digestión anaeróbica, si bien permite estabilizar residuos y generar biogás, su aplicación a pequeña escala presenta dificultades técnicas, requiere instalaciones especializadas y puede liberar olores no deseados [27], [11]. Además, la disponibilidad de nutrientes del digestato es menor en comparación con el compostaje, y su capacidad para mineralizar nitrógeno puede ser limitada [27]. En procesos más innovadores como el sistema de biofloc (BFT), si bien se convierte materia orgánica en proteína microbiana aprovechable por los peces, existen limitaciones operativas, como el elevado consumo energético, los desafíos en países con cortes eléctricos frecuentes, y la estacionalidad en el rendimiento del sistema [34].

Finalmente, los métodos tradicionales suelen carecer de valor añadido y generar productos con escaso atractivo comercial. Por el contrario, los métodos de revalorización buscan generar productos de alta calidad, integrables en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética o agrícola. Esto se alinea con los principios de economía circular, donde los residuos se transforman en recursos valorizables que retornan a la cadena productiva [26], [6], [12]

¿Qué métodos de revalorización muestran mayor potencial de adopción en la industria acuícola?

Los métodos de revalorización que demuestran mayor potencial de adopción en la industria acuícola son aquellos que integran eficiencia ambiental, viabilidad técnica y rentabilidad económica. Destacan entre ellos la hidrolización enzimática, los sistemas IMTA (Acuicultura Multitrófica Integrada), la acuaponía, los procesos de digestión anaeróbica, y las técnicas avanzadas de extracción ecológica, como CO₂ supercrítico o agua subcrítica, los cuales ya han mostrado resultados significativos tanto en entornos experimentales como en fases piloto y comerciales [32], [8], [30].

La hidrolización enzimática ha sido identificada como una técnica limpia, aplicable con tecnologías ya disponibles en plantas procesadoras, que permite transformar residuos en productos de alto valor como colágeno, gelatina o péptidos bioactivos. Su impacto no solo es ambiental (al reducir vertidos), sino también económico y social, al generar empleo y aportar a la seguridad alimentaria [32]. Complementariamente, procesos de extracción como los realizados con CO₂ supercrítico o en agua subcrítica destacan por su capacidad para obtener compuestos de alta pureza sin generar residuos tóxicos, y por su compatibilidad con modelos de economía circular, aunque requieren inversiones iniciales mayores [32].

La acuaponía, en tanto, ha logrado una eficiencia de hasta el 99% en reciclaje de agua, con reducción de fertilizantes del 72% y ahorro hídrico superior al 60%. Su aplicación ya se observa desde el nivel experimental hasta el comercial, convirtiéndose en una de las alternativas más sólidas para producción sustentable [8]. En la misma línea, los sistemas IMTA integran la reutilización de nutrientes de aguas residuales en ciclos productivos, aportando beneficios económicos al aumentar la biomasa vegetal e impulsar la diversificación productiva, además de posicionarse como una solución a largo plazo contra la contaminación acuícola [30].

Otra vía destacada es la digestión anaeróbica, la cual ha permitido producir biogás a partir de residuos como el lodo residual de anchoveta. Este método, aún en etapa experimental, plantea el desarrollo de una “biorrefinería azul” a gran escala y presenta beneficios ambientales claros como la reducción de vertidos y el aprovechamiento de nutrientes en la agricultura [11], [10].

Además, se han desarrollado técnicas como el pirólisis de subproductos de camarón para generar biocarbones funcionales que pueden emplearse en tratamiento de aguas o como fertilizantes. Aunque esta metodología se encuentra aún en fase de laboratorio, su base en materiales comerciales sugiere un potencial de escalamiento futuro [14]. Por otro lado, existen

aplicaciones ya consolidadas como el uso de residuos para alimentación animal, remediación de suelos o catalizadores para biodiésel, cuya adopción industrial ya se ha documentado [23].

Finalmente, la revalorización de subproductos como el colágeno o el aceite de pescado ha derivado en desarrollos en el sector textil y nutracéutico, generando materiales premium y saludables. Estos productos han alcanzado fases comerciales gracias a su alta demanda y aceptación social, especialmente como alternativa a fuentes bovinas o porcinas en contextos con restricciones culturales [25], [35], [18]. En todos los casos, se identifican beneficios económicos, ambientales y sociales que, junto con la compatibilidad técnica y normativa, refuerzan el alto potencial de adopción de estas metodologías dentro de una economía circular acuícola [21].

A continuación, se muestra una tabla que permite visualizar de manera clara los métodos con mayor potencial de adopción, junto con una descripción de sus principales ventajas y limitaciones.

Tabla 8. Métodos de revalorización destacados

Método	Nivel tecnológico	ventajas y limitaciones
Hidrolización enzimática	Piloto	Alta eficiencia en obtención de péptidos bioactivos; limitado por costos de enzimas y consumo energético.
IMTA (Acuicultura Multitrófica Integrada)	Piloto	Sostenible y eficiente en reciclaje de nutrientes; requiere validación normativa y estudios económicos.
Acuaponía	Comercial	Alta eficiencia hídrica y reducción de insumos; ya implementada en contextos reales.
Digestión anaeróbica	Piloto	Produce biogás y reduce residuos; enfrenta desafíos técnicos y olores, aún no ampliamente adoptada.
Extracción ecológica (CO ₂ supercrítico / subcrítica)	Experimental	Alta pureza sin solventes tóxicos; limitada por equipos costosos y baja accesibilidad tecnológica.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta Revisión Sistemática de Literatura evidencian avances significativos en el aprovechamiento de residuos y subproductos acuícolas, orientados a reemplazar prácticas tradicionales de eliminación por estrategias que recuperan valor económico, ambiental y social, en concordancia con los principios de la economía circular. Esta transformación se expresa en una amplia diversidad de métodos, los cuales difieren según el tipo de residuo tratado, la tecnología aplicada y su nivel de desarrollo.

En el caso de los subproductos del procesamiento del pescado (vísceras, piel, espinas y escamas), la hidrólisis enzimática ha sido ampliamente utilizada para la obtención de péptidos funcionales, colágeno y gelatina [17], [18]. Comparada con técnicas químicas tradicionales, esta metodología es más eficiente en la conservación de las propiedades bioactivas y evita el uso de solventes tóxicos. No obstante, enfrenta limitaciones por el alto costo de las enzimas y el consumo energético durante etapas como centrifugación y liofilización [20]. En contraste, se ha propuesto el uso de escamas de pescado para sintetizar

textiles funcionales a partir de colágeno modificado, destacando por su aplicación en sectores de alta demanda como el textil y el biomédico [25]. Si bien ambos métodos permiten valorizar proteínas estructurales del pescado, la propuesta textil tiene mayor potencial comercial inmediato, al integrarse en industrias más desarrolladas, mientras que la hidrólisis requiere mejoras en eficiencia y reducción de costos para escalar.

Respecto a los residuos de crustáceos, como caparazones y cabezas de camarón, se observan dos enfoques principales: la producción de quitina y quitosano mediante extracción química o biológica, y la obtención de materiales carbonosos por pirólisis. La pirólisis ha sido empleada para obtener bioadsorbentes útiles en el tratamiento de aguas [14], mientras que otros estudios han enfocado la recuperación de calcio y compuestos minerales con potencial agrícola [23]. Aunque ambas técnicas aprovechan la rigidez estructural de los caparazones, la pirólisis presenta una ventaja clave en términos de versatilidad del producto final (puede utilizarse como fertilizante, adsorbente o fuente de energía), mientras que la obtención de quitosano requiere mayor pureza y presenta limitaciones ambientales si se usan ácidos fuertes. Sin embargo, el quitosano tiene un mayor valor de mercado y aplicaciones biomédicas más específicas, lo cual le otorga un potencial económico superior en contextos controlados.

En cuanto a la biomasa residual y lodos acuícolas, los métodos más difundidos son el compostaje y la digestión anaeróbica. Se ha demostrado que la digestión anaeróbica permite generar biogás y recuperar nutrientes, convirtiéndose en una solución de doble impacto: energética y ambiental [10]. Por otro lado, el secado solar y compostaje han sido aplicados para transformar residuos marinos en biofertilizantes [28]. Aunque ambos métodos son sostenibles, la digestión anaeróbica tiene una ventaja significativa al generar un subproducto energético, mientras que el compostaje se ve limitado por pérdidas de nutrientes y mayor tiempo de transformación. No obstante, el compostaje es más accesible tecnológicamente para pequeñas unidades productivas, lo que puede favorecer su adopción en contextos rurales o de baja inversión inicial.

Para los efluentes líquidos cargados de nutrientes (N, P), destacan tecnologías como la acuaponía y los sistemas multitrofos integrados (IMTA). Se ha evidenciado que la acuaponía permite un reciclaje del 99 % del agua y una reducción del uso de fertilizantes en un 72 % [8], mientras que los IMTA no solo reducen contaminantes, sino que incrementan la productividad al diversificar especies cultivadas [30]. Si bien ambos sistemas mejoran la eficiencia hídrica y el aprovechamiento de nutrientes, la acuaponía presenta mayor grado de implementación comercial, gracias a su simplicidad operativa y menor requerimiento de conocimientos ecológicos complejos. Por el contrario, el IMTA requiere diseño más elaborado y validación normativa, lo que limita su expansión, aunque su capacidad para cerrar completamente el ciclo de nutrientes le otorga un valor estratégico superior en el largo plazo.

Respecto a los residuos mixtos del procesamiento del pescado, como combinaciones de piel, espinas, escamas y vísceras, se han propuesto modelos de biorrefinerías acuícolas.

Se han aplicado procesos de digestión anaeróbica para producción de biogás y recuperación de fósforo [9], mientras que otras propuestas integran técnicas de extracción de aceite con disolventes verdes y pirólisis [11]. Ambos enfoques promueven el uso integral del residuo, pero el modelo basado en múltiples rutas se distingue por generar mayor diversidad de productos (biogás, aceites, sólidos carbonosos), lo cual diversifica el ingreso y mejora la resiliencia del sistema. No obstante, su complejidad tecnológica y alto costo de inversión inicial hacen que su adopción sea viable solo en instalaciones medianas o grandes, mientras que el enfoque de digestión resulta más escalable en contextos locales.

Finalmente, se destacan las tecnologías emergentes como la extracción con CO₂ supercrítico, agua subcrítica o el uso de disolventes verdes [32], [20]. Estas técnicas permiten obtener productos de alta pureza sin generar residuos tóxicos, siendo altamente compatibles con sectores farmacéutico y cosmético. Sin embargo, requieren equipamiento especializado y condiciones de operación exigentes, lo cual limita su adopción fuera de laboratorios o plantas piloto. Frente a ello, métodos como la hidrólisis o el compostaje, aunque más simples, son más viables para entornos rurales o con baja disponibilidad de tecnología.

En síntesis, la elección del método de revalorización depende del tipo de residuo, los objetivos productivos, la escala y el contexto en que se aplique. Destacan la hidrólisis enzimática, la acuaponía y la digestión anaeróbica por su equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y viabilidad. Sin embargo, muchas de estas tecnologías aún requieren validación en condiciones reales. Se recomienda promover investigaciones aplicadas, análisis costo-beneficio y políticas públicas que fomenten su adopción y articulación con otros sectores productivos.

V. CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática permitió identificar que el manejo de residuos en la acuicultura aún presenta enfoques limitados, con predominio de prácticas de descarte que generan impactos ambientales y pérdidas de valor. Frente a ello, las técnicas de revalorización como la hidrólisis enzimática, digestión anaeróbica, acuaponía e IMTA se consolidan como alternativas viables y sostenibles, al transformar residuos en productos útiles como biofertilizantes, péptidos funcionales o biogás.

Entre los hallazgos más relevantes, destacan la eficiencia de la hidrólisis para obtener compuestos de alto valor, así como el potencial de los sistemas integrados para cerrar ciclos productivos. Sin embargo, muchas de estas soluciones aún están en fase experimental y enfrentan barreras como altos costos, baja adopción industrial.

Por ello, se recomienda que futuras investigaciones validen estas tecnologías en contextos reales, evalúen su viabilidad económica. La valorización de residuos acuícolas representa una oportunidad concreta para impulsar una acuicultura más circular, eficiente y sostenible.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024,» FAO, Roma, 2024.
- [2] P. R. P. G.-O. A. P. A. L. M. P. M. Q. J. S.-G. M. Fraga-Corral, «Aquaculture as a circular bio-economy model with Galicia as a study case,» *Trends in Food Science & Technology*, vol. 119, pp. 23 - 35, 2022.
- [3] L. L. P. L. L. D. M. X. X. L. H. Z. X. Z. K. W. G. X. X. L. Bohan Li, «The overlooked contribution of aquaculture to phosphorus pollution in,» *Science of the Total Environment*, vol. 968, 2025.
- [4] A. A. A. S. T.-F. A. O. A. Akeem Babatunde Dauda, «Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in,» *Aquaculture and Fisheries*, vol. 4, n° 3, pp. 81 - 88, 2019.
- [5] E. M. S. B. E. B. S. C. E. V. F. E. Á. O. O. H. R. T. A. F. D. G. Z. P. P. G. A. B. L. P. Elisa Benini, «Bioactive peptides from salmon aquaculture processing by-product affect growth performance, plasma biochemistry, gut health, and stress resistance of gilthead seabream (*Sparus aurata*),» *Aquaculture Reports*, vol. 42, 2025.
- [6] E.-J. H. Y.-Y. H. T.-W. H. T.-H. L. Y.-Y. H. Y.-C. L. H.-T. C. Chi-Shih Huang, «Recycling aquaculture waste for textile functional material to facilitate the creation of novel and sustainable jeans,» *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, vol. 20, 2025.
- [7] A. A. M. F. I. S. R. S. A. A. R. O. H. A. H. Setyo Budi Kurniawan, «Achieving a Biocircular Economy in the Aquaculture Sector Through Waste Valorization,» *Toxics*, vol. 13, n° 2, pp. 2 - 18, 2025.
- [8] L. H.-A. G. A.-C. M. d. J. M.-H. G. S.-V. C. J. C.-C. L. G. H.-M. Roberto G. Chiquito-Contreras, «Aquaculture—Production System and Waste Management for Agriculture Fertilization—A Review,» *Sustainability*, vol. 14, n° 12, pp. 4-5, 2022.
- [9] Ç. A. E. M. Jingsi Zhang, «Nutrient recovery and recycling from fishery waste and by-products,» *Journal of Environmental Management*, vol. 14, n° 20, 2023.
- [10] J. D. V. A. J. Victor Lobanov, «Simultaneous biomethane production and nutrient remineralization from aquaculture solids,» *Aquacultural Engineering*, vol. 27, n° 2, 2023.
- [11] F. F. D. M. P. A. S. M. P. R. C. a. P. S. C. Emilia Paone, «Towards the anchovy biorefinery: Biogas production from anchovy processing waste after fish oil extraction with biobased limonene,» *Sustainability*, vol. 13, n° 5, pp. 1-12, 2021.
- [12] F. L. a. C. E. Corcione, «Recent Applications of Biopolymers Derived from Fish Industry Waste in Food Packaging,» *Polymers*, vol. 31, 2022.
- [13] C.-S. H. Y.-C. L. H.-T. C. V. 3. Erh-Jen Hou, «Upcycled aquaculture waste as textile ingredient for promoting,» *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 31, 2022.
- [14] Z. I. G. K. D. S. a. C. A. Ioannis Fotodimas, «Sustainable Management of Shrimp Waste to Produce High-Added Value Carbonaceous Adsorbents,» *Sustainability*, vol. 16, n° 23, 2024.
- [15] S. R. J. A. B. y. J. C. Adrián Honrado, «Fish By-Product Valorization as Source of Bioactive Compounds for Food Enrichment: Characterization, Suitability and Shelf Life,» *Foods*, vol. 11, n° 22, 2022.
- [16] B. S.-R. G. P. J. E. S.-H. H. M. N. I. R. P.-S. A. D. B. a. E. M. M.-M. Lynette Alvarado-Ramírez, «Sustainable production of biofuels and bioderivatives from aquaculture and marine waste,» *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 16, n° 23, 2023.
- [17] B. I. J. L. y. C. B. Haizea Domínguez, «Fish Viscera Hydrolysates and Their Use as Biostimulants for Plants as an Approach towards a Circular Economy in Europe: A Review,» *Sustainability*, vol. 16, n° 20, 2024.
- [18] C. L. F. P. E. G. R. C. R. D. d. P. Daniela Coppola, «Fish Waste: From Problem to Valuable Resource,» *Marine Drugs*, vol. 19, n° 2, 2021.
- [19] B. S.-R. G. P. J. E. S.-H. H. M. N. I. R. P.-S. A. D. B. a. E. M. M.-M. Lynette Alvarado-Ramírez, «Sustainable production of biofuels and bioderivatives from aquaculture and marine waste,» *Frontiers*, vol. 4, 2023.
- [20] ". Dondero1, «Unlocking the Potential of Marine Sidestreams in the Blue Economy,» *Marine Biotechnology*, vol. 27, n° 2.
- [21] F. L. A. D. J. G. V. A. a. M. Z. M. by Neil Cutajar, «Turning Waste into A Resource: Isolation and Characterization of High-Quality Collagen and Oils from Atlantic Bluefin Tuna Discards,» *Applied Sciences*, vol. 12, n° 3, 2022.
- [22] R. E. N. R. T. V. M. C. V. Z. Mirko Motalipassi, «Bioactive compounds of nutraceutical value from fishery and aquaculture discards,» *Foods*, vol. 10, n° 7, 2021.
- [23] M. L. G. C. E. A. F. y. E. T. por Daniela Summa, «Trends and Opportunities of Bivalve Shells' Waste Valorization in a Prospect of Circular Blue Bioeconomy,» *Resources*, vol. 11, n° 5, 2022.
- [24] M. L. G. C. E. A. F. y. E. T. por Daniela Summa, «Trends and Opportunities of Bivalve Shells' Waste Valorization in a Prospect of Circular Blue Bioeconomy,» *Resources*, vol. 11, n° 5, 2022.
- [25] C.-S. H. Y.-C. L. Y.-S. H. H.-T. C. Erh-Jen Hou, «A method for the process of collagen modified polyester from fish scales waste,» *MethodsX*, vol. 9, 2022.
- [26] D. B. d. S. A. F.-R. S. M. N. R. A. P. M. M. H. J. L. L. R. A. H. W. E. C. Ronan Cooney, «A circular economy framework for seafood waste valorisation to meet challenges and opportunities for intensive production and sustainability,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 392, 2023.
- [27] F. "Nenciu y I. Voicea, «“Zero-Waste” Food Production System Supporting the Synergic Interaction between Aquaculture and Horticulture,» *Sustainability*, vol. 14, n° 20, 2022.
- [28] M. C. T. M. F. M. d. C. E. O. Z. G. A. D. N. a. G. A. M.-P. Beatriz Castillo-Téllez, «Solar-Dried Biofertilizers from Marine Waste: Enhancing the Circular Economy,» *Sustainability*, vol. 16, n° 15, 2022.
- [29] R. S. B. R. T. M. G. Maria Cozzolino, «Circular economy in aquaculture: An Italian survey to understand perceptions, challenges and options for transition,» *Marine Policy*, vol. 176, 2025.
- [30] H. & P. S. Yavuzcan Yıldız, «Towards zero waste: Sustainable waste management in aquaculture,» *Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 39, n° 4, 2022.
- [31] M. K. M. S. M. S. A. K. Marge Lanno, «Distribution of phosphorus forms depends on compost source material,» *resources*, vol. 10, n° 10, 2021.
- [32] M. R. I. S. S. 2. M. Y. J.-S. P. H.-J. L. 4. a. B.-S. C. Vikash Chandra Roy, «Trash to Treasure: An Up-to-Date Understanding of the,» *Marine Drugs*, vol. 21, n° 9, 2023.
- [33] R. S. B. R. T. M. G. Maria Cozzolino, «Diving into Fish Valorisation: Review Opportunities and Analyzing Azorean Fish Data,» *Processes*, vol. 11, n° 7, 2023.
- [34] N. O. O. K. O. O. D. N. K. J. M. M. Erick O. Ogello, «The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development,» *Scientific African*, vol. 14, 2021.
- [35] L. F. X. C. C. M. B. S. K. V. B. C. A. Q.-J. A. A. V. M. P. R. Xianzheng Ma, «Efficient treatment of high-salinity aquaculture effluents through synergistic membrane distillation and VUV/UVC photolysis,» *Journal of Water Process Engineering*, vol. 66, 2024.