



# Extracción de colágeno a partir de subproductos de pescado: aplicaciones en la industria alimentaria, biomédica y cosmética

## Collagen extraction from fish by-products: applications in the food, biomedical, and cosmetic industries

Steffany Cruz-Guerrero<sup>1\*</sup>; Jennifer Fernandez<sup>1</sup>; Haley Milagritos Figueroa-Avalos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

\* Autor corresponsal: [t022400720@unitru.edu.pe](mailto:t022400720@unitru.edu.pe) (S. Cruz-Guerrero).

ORCID de los autores:

S. Cruz-Guerrero: <https://orcid.org/0009-0003-4199-6078>

J. Fernandez: <https://orcid.org/0009-0008-0404-5894>

H. M. Figueroa-Avalos: <https://orcid.org/0000-0002-3658-7005>

### RESUMEN

El presente artículo tuvo como objetivo analizar las técnicas de extracción y aplicaciones del colágeno obtenido a partir de subproductos de pescado, resaltando su potencial industrial. La metodología combinó revisión literaria y análisis bibliométrico de 153 publicaciones indexadas en Scopus. Se emplearon como términos claves "fish by-product", "collagen", "extraction" y "gelatine", y los softwares VosViewer y Bibliometrix para el análisis de la información recopilada. Se destacaron métodos tradicionales y modernos de extracción, como hidrólisis ácida, enzimática y el uso de ultrasonidos, que buscan optimizar la calidad y eficiencia del colágeno extraído. Los resultados evidenciaron que el colágeno de subproductos de pescado posee ventajas frente a fuentes convencionales, tales como menor riesgo sanitario, mayor aceptación cultural y alta biodisponibilidad. En cuanto a sus aplicaciones, se utiliza en la industria alimentaria para empaques biodegradables, en cosmética para productos antienvejecimiento y cuidado capilar, y en biomedicina para regeneración tisular y apósitos. El análisis bibliométrico muestra un crecimiento constante en la producción científica, liderada por España y China. En conclusión, el colágeno derivado de residuos pesqueros representa una alternativa sostenible con amplio potencial para la economía circular y el desarrollo de productos de alto valor agregado.

**Palabras clave:** Fuentes convencionales; biodisponibilidad; biomedicina; Análisis bibliométrico.

### ABSTRACT

The objective of this article was to analyze the extraction techniques and applications of collagen obtained from fish by-products, highlighting its industrial potential. The methodology combined a literature review and bibliometric analysis of 153 publications indexed in Scopus. The keywords "fish by-product," "collagen," "extraction," and "gelatin" were used, and the VosViewer and Bibliometrix software were used to analyze the information collected. Traditional and modern extraction methods were highlighted, such as acid hydrolysis, enzymatic hydrolysis, and the use of ultrasound, which seek to optimize the quality and efficiency of the extracted collagen. The results showed that collagen from fish by-products has advantages over conventional sources, such as lower health risks, greater cultural acceptance, and high bioavailability. In terms of its applications, it is used in the food industry for biodegradable packaging, in cosmetics for anti-aging and hair care products, and in biomedicine for tissue regeneration and dressings. Bibliometric analysis shows steady growth in scientific production, led by Spain and China. In conclusion, collagen derived from fish waste represents a sustainable alternative with broad potential for the circular economy and the development of high value-added products.

**Keywords:** Conventional sources; bioavailability; biomedicine; bibliometric analysis.

Recibido: 12-11-2025.

Aceptado: 15-02-2026.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

A nivel global, la industria pesquera genera grandes cantidades de residuos en los mercados y plantas procesadoras, incluyendo piel, escamas y huesos. Sin embargo, la inadecuada gestión de estos residuos causa contaminación ambiental (Moufaddel et al., 2024).

En este contexto, se han identificado que a partir de subproductos pesqueros se pueden obtener productos valiosos como el colágeno, debido a sus múltiples aplicaciones y beneficios para la salud (Barai et al., 2025). El colágeno es una proteína estructural esencial del tejido conectivo que representa entre el 25% y 30% de las proteínas. Se emplea en cosmética, medicina, fabricación de hilos y embalaje (Matinong et al., 2022).

En los peces, el colágeno se encuentra principalmente en la piel, escamas y espinas, no obstante, para su obtención se requiere etapas como limpieza, reducción de tamaño, eliminación de impurezas, extracción y precipitación (Isnaini et al., 2024). Además, el colágeno extraído a partir de subproductos de pescado presenta notables propiedades bioactivas y funcionales, lo que permite su aplicación en diversos sectores no solo en la industria farmacéutica sino también en el sector alimentario, cosmético y de productos de cuidado personal (Xu et al., 2023b).

Por otra parte, para la extracción de colágeno son fundamentales los parámetros de temperatura, tiempo y concentración de ácido debido a que afectan el rendimiento de colágeno y su optimización (Widayat et al., 2023). En este sentido, la evolución en metodologías de extracción de colágeno ha transitado desde enfoques clásicos (hidrólisis ácida y enzimática con pepsina) hacia

métodos innovadores buscando optimizar el rendimiento y la pureza del colágeno obtenido (Lu et al., 2023).

Los métodos para la obtención de colágeno se clasifican principalmente en dos categorías: tradicionales y alternativos. Los métodos tradicionales de extracción suelen emplear hidrólisis química mediante tratamientos ácidos, alcalinos o salinos. En ciertas ocasiones, se combinan con ultrasonido, microondas o enzimas para mejorar el proceso (Senadheera et al., 2020). Además, factores como la temperatura, el tiempo y el tipo de solvente son parámetros clave que determinan el rendimiento de la extracción de colágeno (Jafari et al., 2020).

Por otra parte, respecto a los métodos alternativos, La hidrólisis enzimática es considerada una técnica eficaz para convertir residuos pesqueros (trucha, anchoveta, atún, etc.) en productos de alto valor, como proteínas, colágeno o aceites. Asimismo, su eficacia depende de controlar condiciones como temperatura y tipo de enzima, permitiendo reducir desechos y aprovechar subproductos de forma sostenible (Araujo et al., 2020; Korkmaz & Tokur, 2022; Garofalo et al., 2023).

En este contexto, se presenta un creciente interés por la aplicación de métodos alternativos para la obtención de colágeno y el aprovechamiento de subproductos de pescado. Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar las técnicas de obtención de colágeno a partir de subproductos de pescado, complementado con un análisis bibliométrico que oriente futuras investigaciones en el área.

## VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL COLÁGENO DE SUBPRODUCTOS DE PESCADO

Los ecosistemas marinos representan una fuente prometedora para la producción de colágeno, destacando por su bajo potencial de transmisión de enfermedades zoonóticas. La biomasa marina ofrece importantes ventajas como materia prima para este biopolímero, permitiendo procesos de extracción más sostenibles y con menor impacto ambiental en comparación con métodos convencionales (Coppola et al., 2020).

El colágeno obtenido de especies pesqueras se consolida como alternativa a las fuentes tradicionales (bovino/porcino), particularmente en aplicaciones biomédicas avanzadas. Estudios recientes destacan su idoneidad para el desarrollo de membranas regenerativas y otros biomateriales, gracias a sus propiedades fisicoquímicas superiores (de Souza et al., 2022; Jo et al., 2025; Li et al., 2024). El colágeno de pescado ofrece significativas ventajas comparativas frente al de origen mamífero. Entre sus beneficios destacan: un riesgo reducido de transmisión de enfermedades zoonóticas, ausencia de restricciones culturales o religiosas, mayor

biodisponibilidad y procesos de producción más rentables. Su obtención a partir de subproductos pesqueros (pieles y escamas) ha experimentado un rápido crecimiento, impulsado tanto por el bajo coste de estas materias primas como por la necesidad de reducir el impacto ambiental de los residuos de la industria pesquera (Rajabimashhadi et al., 2023; Rusinek et al., 2023).

Por otro lado, el colágeno de pescado posee notables beneficios para la salud, sin embargo, enfrenta importantes limitaciones: contiene pocos aminoácidos esenciales, ofrece escasa resistencia mecánica, presenta un bajo punto de fusión, tiene reducida rigidez biomecánica y baja estabilidad térmica (Furtado et al., 2022; Subhan et al., 2015; Yunoki et al., 2022).

En la Figura 1 se observa las ventajas del colágeno obtenido de residuos de pescado frente al de fuentes tradicionales, respecto a su biodisponibilidad, restricciones culturales y menores riesgos sanitarios.



**Figura 1.** Ventajas del colágeno de origen marino frente a fuentes tradicionales.

### TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN

Los métodos convencionales de extracción enfrentan importantes limitaciones debido al uso de soluciones ácidas y alcalinas fuertes. Aunque se consideran métodos eficaces, implican procesos largos y complejos que generan serios problemas ambientales. La extracción ácida y alcalina presenta como principal desventaja su impacto ecológico negativo, derivado del empleo de sustancias químicas agresivas (Gallego et al., 2025). Asimismo, las técnicas basadas en ácido acético y pepsina presentan desventajas como procesos prolongados, daño a las muestras y uso de disolventes. Por otra parte, los métodos modernos que emplean ultrasonidos ofrecen rendimientos superiores y mejor preservación de la estructura del colágeno. Estas técnicas modernas no solo son más eficientes, sino que también fortalecen las propiedades estructurales del colágeno extraído (Farooq et al., 2024). Asimismo, se destacan técnicas modernas como el uso de disolventes eutécticos

profundos (DES) y fluidos supercríticos (SFE), que permiten un proceso más eficiente y respetuoso con el medio ambiente (Gaikwad & Kim, 2024).

En la Tabla 1 se comparan ocho métodos para extraer colágeno, desde técnicas tradicionales como la hidrólisis ácida y alcalina hasta métodos modernos como la extracción enzimática, por ultrasonido y con fluidos supercríticos. Cada método presenta ventajas en rendimiento o sostenibilidad, pero también limitaciones como corrosividad, altos costos o efectos en la calidad del producto.

En la Tabla 2 se presentan los estudios recientes sobre extracción de colágeno de subproductos de pescado, incluyendo tilapia, bagre y carpa. Se detalló métodos como extracción enzimática, con ácido acético y ultrasonido, reportando rendimientos y propiedades funcionales como actividad antioxidante y antiinflamatoria.

**Tabla 1**

Ventajas y desventajas de los métodos de extracción de colágeno

Métodos	Ventajas	Desventajas	Referencias
Hidrólisis ácida	Mayor rendimiento Colágeno con estabilidad térmica	Altamente corrosivas Producto final con altas concentraciones de sal	(Shaik et al., 2021; Al Hajj et al., 2024; Laasri et al., 2023)
Hidrólisis alcalina	Capacidad para hidrolizar fibrillas de colágeno Utiliza compuestos comunes como hidróxido de sodio o potasio	Altamente corrosivas Producto final con altas concentraciones de sal	(Matinong et al., 2022; Al Hajj et al., 2024)
Hidrólisis enzimática	Más respetuosa con el medio ambiente El colágeno obtenido contiene más aminoácidos	Costo más elevado Calidad del colágeno depende del método de inactivación térmica	(Chotphruethipong et al., 2021; Amirrah et al., 2022; Kristoffersen et al., 2022; Laasri et al., 2023)

Extracción por microondas	Calentamiento uniforme y acelerado Minimiza impactos ecológicos	Alta potencia reduce la eficiencia A mayor tiempo, menor viscosidad y puntos de fusión.	(Mirzapour-Kouhdasht et al., 2019; Jin et al., 2019; Adhar et al., 2022; Xu et al., 2023a)
Extracción asistida por ultrasonido	Reduce el tiempo de extracción con alto rendimiento No afecta la microestructura del colágeno	Degradación de colágeno en tratamientos prolongados Reduce la viscoelasticidad de los geles de colágeno	(Zhang et al., 2020; Kaewbangkerd et al., 2023; Liu et al., 2023)
Extracción de fluidos supercríticos	Extracción selectiva y rápida Mayor rendimiento	Altas temperaturas reducen la densidad del fluido supercrítico La extracción prolongada puede degradar el analito por exposición al fluido supercrítico	(Ahangari et al., 2021; López-Hortas et al., 2022; Fraguera-Meissimilly et al., 2023)
Extracción profunda con disolvente eutéctico	Bajo coste Destaca por su baja toxicidad y carácter ecológico	Baja eficiencia de extracción debido a su alta viscosidad Baja selectividad	(Cunha & Fernandes, 2018; Soltanmohammadi et al., 2021; Zhou et al., 2022)
Extracción por solubilización de sal	Mejora de propiedades emulsionantes	A superiores concentraciones de sal, menor capacidad de extracción A mayor concentración de sal, menor formación de fibrillas de colágeno	(Tian et al., 2021; Zhao et al., 2022)

Tabla 2

Estudios sobre la extracción de colágeno a partir de subproductos de pescado

Especie	Parte utilizada	Método de extracción	Condiciones clave	Resultados	Referencia
<i>Oreochromis niloticus</i>	Piel	Hidrolisis enzimática	Temperatura: 58,4°C, pH: 8,7 (óptimos para el grado de hidrolisis y para el poder antioxidante reductor férrico) pH: 7,0 (óptimo para las actividades de eliminación de radicales)	Se optimizó la hidrólisis enzimática de proteína de piel de tilapia con alcalasa 2.4.L, obteniendo péptidos bioactivos antioxidantes	(Mohammad et al., 2023)
<i>Cypselurus melanurus</i> , <i>Catla catla</i> , <i>Clarias batrachus</i> y <i>Pangasius pangasius</i>	Piel	Extracción con ácido acético	Eliminación de proteína no colágena: NaOH 0,1N, 24 h. Lavado: H2O destilada fría (3 veces). Desengrase: Butanol 10%, 24 h. Extracción: Ácido acético 0,5 M, 24 h.	El hidrolizado de colágeno de <i>Clarias batrachus</i> y <i>Pangasius pangasius</i> reduce significativamente la expresión de proteínas inflamatorias en macrófagos, demostrando actividad antiinflamatoria	(Sivaraman & Shanthi, 2021)
<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	Piel y hueso	Agua acidificada con CO <sub>2</sub> en condiciones supercríticas	Presión: 75 bar Temperatura: 37 °C Tiempo: 24 h (condiciones óptimas de extracción)	Se recuperó colágeno/gelatina de bagre usando agua acidificada con CO <sub>2</sub> en condiciones supercríticas, con rendimientos del 37% (piel) y 8% (hueso), viable a escala industrial	(Phon et al., 2023)
<i>Cyprinus carpio</i>	Escamas	Extracción con pepsina más ultrasonido	Dosis de enzima: 300 mg/g Tiempo ultrasónico: 200 min Concentración de ácido acético: 0,3 mol/L Relación sólido-líquido: 1:40 (g/mL)	Extracción óptima de colágeno de escamas de carpa: 28,7% de rendimiento con ultrasonido	(Gao, 2021)
<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Vejiga natatoria	Disolventes eutécticos profundos	Urea-ácido láctico (U-LA, 1:10 p/v)	Los disolventes eutécticos profundos basados en urea mejoran la recuperación, solubilidad y gelificación del colágeno, manteniendo alta estabilidad en pH y sal.	(Zhou et al., 2024)
<i>Chitala ornata</i>	Piel	Proceso asistido por ultrasonido	Amplitud: 20% - 80% Tiempo: 10 - 30 min	El ultrasonido aumentó el rendimiento de colágeno sin afectar su estructura molecular, aunque redujo ligeramente su pureza.	(Petcharat et al., 2021)

## APLICACIONES

En la Figura 2 se esquematizan las aplicaciones del colágeno extraído a partir de subproductos de pescado, con base en la literatura científica actual.

### Industria Alimentaria

El colágeno derivado de residuos de pescado se utiliza en la industria alimentaria para desarrollar biopolímeros aplicados al envasado de alimentos, destacando su uso en empaques inteligentes que mejoran las propiedades de barrera y conservación, promoviendo así una alternativa sostenible dentro de un enfoque de economía circular (Lionetto & Esposito Corcione, 2021).

Por otro lado, su aplicación se ve limitada por su sabor desagradable, por lo que es crucial eliminarlo para aprovechar sus beneficios en alimentos funcionales, mejorando así su aceptación y uso en productos alimentarios (Wang et al., 2023).

Últimos hallazgos han evidenciado el potencial del colágeno en aplicaciones de envasado alimentario. Por ejemplo, el colágeno extraído de piel de bacalao se utiliza en películas compuestas con propiedades mecánicas, barrera y antimicrobianas, siendo una opción prometedora para el envasado y almacenamiento de alimentos en la industria alimentaria (Mao et al., 2024). Asimismo, el colágeno extraído de la piel de gorguera negra se aplicó en la elaboración de películas colágeno-quitosano para envases de alimentos, mostrando propiedades emulsificantes y estabilidad (Bhuimbar et al., 2019). Además, el extraído de escamas de bocachico, destaca por sus propiedades biodegradables, hidrofóbicas y formación de películas transparentes y menos solubles (Moreno-Ricardo et al., 2024).

### Industria cosmética

El colágeno para cosmética, tradicionalmente obtenido de fuentes bovinas y porcinas, enfrenta limitaciones por disponibilidad, religión y salud (Prajaputra et al., 2024). Este componente, presente en los descartes del procesamiento de recursos

pesqueros, es un componente fundamental de la piel, el cabello y las uñas, lo que lo hace valioso en el sector cosmético. Su biocompatibilidad, estabilidad y propiedades fisicoquímicas mejoradas lo convierten en un ingrediente clave en productos destinados al cuidado de la piel y antienvjecimiento (Subhan et al., 2021). Informes recientes han mostrado resultados prometedores sobre el uso del colágeno marino en cosmética. Por ejemplo, en el estudio de Amnuakit et al. (2022), el colágeno hidrolizado obtenido de piel de lubina asiática mostró efectos positivos en la piel facial, con mejoras visibles en parámetros cutáneos. Su aplicación en sueros cosméticos evidenció propiedades antienvjecimiento y aclaradoras, destacando su potencial como ingrediente eficaz en productos cosmeceúticos. Además, Igielska-Kalwat et al. (2025) destaca que el colágeno obtenido por upcycling mediante ultrafiltrado de agua procedente de la producción de colágeno de piel de pescado, se usa en cosméticos capilares para prevenir puntas abiertas y roturas. Sus aplicaciones incluyen mejorar grosor, densidad, brillo e hidratación del cabello, demostrando eficacia en tratamientos sostenibles para el cuidado capilar.

Sin embargo, para Siahhan et al. (2022) su desarrollo enfrenta desafíos relacionados con la comprensión del mecanismo de acción, la necesidad de modelos de prueba adecuados, y aspectos de higiene, seguridad y viabilidad económica. Aunque pocos ingredientes cosméticos marinos se han comercializado, el colágeno presenta una oportunidad para innovar en cosmética azul sostenible.

### Industria biomédica

Los biomateriales derivados del colágeno presentan múltiples ventajas, entre ellas su capacidad de degradación natural, resistencia mecánica y efectos favorables sobre las células (Rezvani Ghomi et al., 2021). Estas características permiten su uso en aplicaciones biomédicas.



Figura 2. Aplicaciones del colágeno extraído a partir de subproductos de pescado.



La comparación entre las nubes de palabras de los períodos 2004–2017 y 2017–2025 revela una continuidad en temas como colágeno, hidrolizados, aceite de pescado y subproductos. Estas tendencias se confirman en la red de coocurrencia, donde dichos términos aparecen como nodos centrales altamente conectados. La red, además, permitió observar la evolución y especialización temática reciente, con nuevos conceptos emergentes como bioactividad, economía circular y biocompatibilidad, que reflejan el enfoque actual hacia un aprovechamiento sostenible e innovador de los residuos pesqueros. En la Figura 4b se observa la producción científica

anual, que mostró un incremento sostenido de publicaciones desde 2004, con un notable aumento entre 2021 y 2024, sin embargo, se espera que al finalizar el año 2025 la producción científica al respecto sea sobresaliente. En el mismo rango de años, España fue el país que tuvo más documentos acumulados (23), seguido de China (21), como se observa en la Figura 4a.

La producción científica anual aumentó después de 2017, coincidiendo con el aumento de contribuciones de estos países. Esto sugiere que su liderazgo se consolidó en la última década.

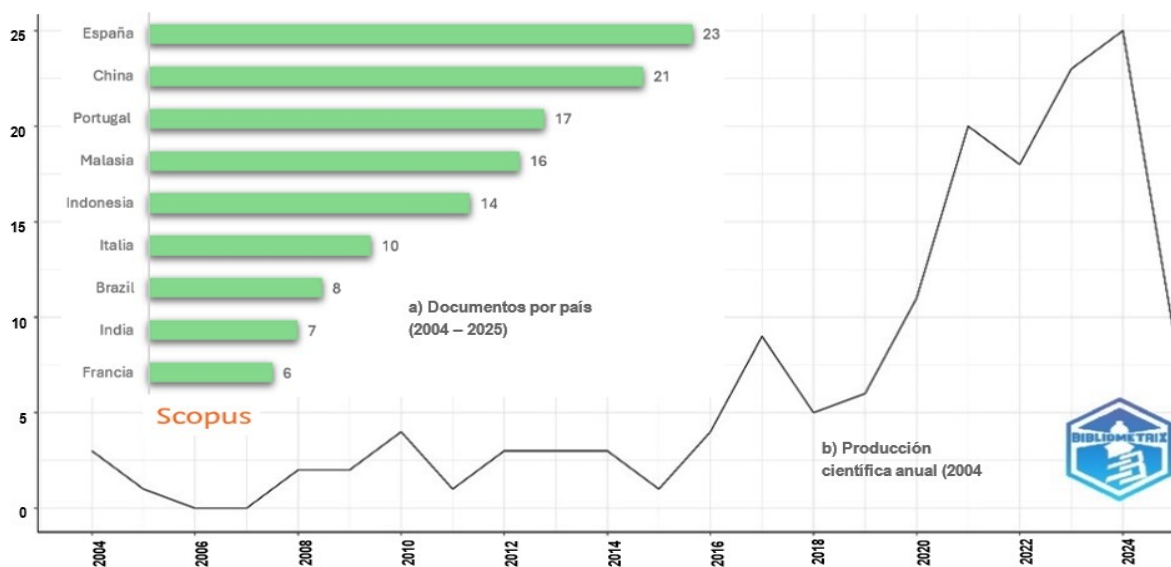


Figura 4. Producción científica entre los años 2004 y 2025. (a) Número de documentos por país. (b) Tasa de publicaciones.

## CONCLUSIONES

El colágeno extraído de subproductos de pescado ofrece importantes ventajas: alta biodisponibilidad, bajo riesgo de transmisión de enfermedades y aceptación cultural amplia, consolidándose como una alternativa sostenible frente a fuentes tradicionales. Sin embargo, su adopción masiva se ve limitada por desafíos como la baja estabilidad térmica y resistencia mecánica, que requieren el desarrollo de métodos de extracción más eficientes, como técnicas combinadas. Su aplicación en sectores

como la alimentación, cosmética y biomedicina demuestra su gran versatilidad y valor agregado. Además, el análisis bibliométrico evidenció un crecimiento sostenido en la producción científica sobre este tema, principalmente en España y China. Se recomienda, para futuras investigaciones, explorar modificaciones químicas del colágeno, que mejoren sus propiedades para aplicaciones avanzadas, y evaluar el impacto socioeconómico y ambiental de su producción a gran escala.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Adhar, M., HadjKacem, B., Périno-Issartier, S., Amor, I. B., Feki, A., Gargouri, J., Gargouri, A., Tounsi, S., Chemat, F., & Allouche, N. (2022). Thymol-enriched extract from *Thymus vulgaris* L leaves: Green extraction processes and antiaggregant effects on human platelets. *Bioorganic Chemistry*, *125*, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2022.105858>
- Ahangari, H., King, J. W., Ehsani, A., & Yousefi, M. (2021). Supercritical fluid extraction of seed oils – A short review of current trends. *Trends in Food Science & Technology*, *111*, 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.066>
- Al Hajj, W., Salla, M., Krayem, M., Khaled, S., Hassan, H. F., & Khatib, S. E. (2024). Hydrolyzed collagen: Exploring its applications in the food and beverage industries and assessing its impact on human health – A comprehensive review. *Heliyon*, *10*(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36433>
- Al Husaeni, D. F. A., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). Bibliometric using VOSviewer with Publish or Perish (using Google Scholar data): From step-by-step processing for users to the practical examples in the analysis of digital learning articles in pre and post COVID-19 pandemic. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, *2*(1), Article 1. <https://doi.org/10.17509/ajse.v2i1.37368>
- Amirrah, I. N., Lokanathan, Y., Zulkiflee, I., Wee, M. F. M. R., Motta, A., & Fauzi, M. B. (2022). A Comprehensive Review on Collagen Type I Development of Biomaterials for Tissue Engineering: From Biosynthesis to Bioscaffold. *Biomedicines*, *10*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/biomedicines10092307>
- Amnuakit, T., Shankar, R., & Benjakul, S. (2022). Hydrolyzed Fish Collagen Serum from By-Product of Food Industry: Cosmetic Product Formulation and Facial Skin Evaluation. *Sustainability*, *14*(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/su142416553>

- Araujo, J., Costa, C., & Márquez, M. C. (2020). Enzymatic Hydrolysis of Fish Waste as an Alternative to Produce High Value-Added Products. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 847-855. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01029-x>
- Barai, A. A., Inhamuns, A. J., Nóbrega, T. C., Guimarães, C. C., Mourão, L. dos S., de Souza, A. F. L. F., Pontes, F. B., Farias, F. D. F., Mendes, J. M., Rufino, J. P. F., & de Oliveira, A. T. (2025). Extraction of collagen from by-products of Amazonian fish tambaqui, *Colossoma macropomum* and pirarucu *Arapaima gigas*. *Applied Food Research*, 5(1), 100720. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100720>
- Bhuimbar, M. V., Bhagwat, P. K., & Dandge, P. B. (2019). Extraction and characterization of acid soluble collagen from fish waste: Development of collagen-chitosan blend as food packaging film. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102983. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102983>
- Chotphruethipong, L., Binlath, T., Hutamekalin, P., Sukketsiri, W., E. Aluko, R., & Benjakul, S. (2021). In vitro antioxidant and wound-healing activities of hydrolyzed collagen from defatted Asian sea bass skin as influenced by different enzyme types and hydrolysis processes. *RSC Advances*, 11(30), 18144-18151. <https://doi.org/10.1039/D1RA03131G>
- Coppola, D., Oliviero, M., Vitale, G. A., Lauritano, C., D'Ambra, I., Iannace, S., & de Pascale, D. (2020). Marine Collagen from Alternative and Sustainable Sources: Extraction, Processing and Applications. *Marine Drugs*, 18(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/md18040214>
- Cunha, S. C., & Fernandes, J. O. (2018). Extraction techniques with deep eutectic solvents. *TRAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.05.001>
- de Souza, A., de Almeida Cruz, M., de Araújo, T. A. T., Parisi, J. R., do Vale, G. C. A., dos Santos Jorge Sousa, K., Ribeiro, D. A., Granito, R. N., & Renno, A. C. M. (2022). Fish collagen for skin wound healing: A systematic review in experimental animal studies. *Cell and Tissue Research*, 388(3), 489-502. <https://doi.org/10.1007/s00441-022-03625-w>
- Farooq, S., Ahmad, M. I., Zheng, S., Ali, U., Li, Y., Shixiu, C., & Zhang, H. (2024). A review on marine collagen: Sources, extraction methods, colloids properties, and food applications. *Collagen and Leather*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s42825-024-00152-y>
- Fraguela-Meissimilly, H., Bastías-Monte, J. M., Vergara, C., Ortiz-Viedma, J., Lemus-Mondaca, R., Flores, M., Toledo-Merma, P., Alcázar-Alay, S., & Gallón-Bedoya, M. (2023). New Trends in Supercritical Fluid Technology and Pressurized Liquids for the Extraction and Recovery of Bioactive Compounds from Agro-Industrial and Marine Food Waste. *Molecules*, 28(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/molecules28114421>
- Furtado, M., Chen, L., Chen, Z., Chen, A., & Cui, W. (2022). Development of fish collagen in tissue regeneration and drug delivery. *Engineered Regeneration*, 3(3), 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.05.002>
- Gaikwad, S., & Kim, M. J. (2024). Fish By-Product Collagen Extraction Using Different Methods and Their Application. *Marine Drugs*, 22(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/md22020060>
- Gallego, C., Rodil, E., Rodríguez, H., & Soto, A. (2025). Extraction and characterisation of gelatine from yellowfin tuna skin pretreated with a eutectic solvent. *Food Hydrocolloids*, 159, 110652. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110652>
- Gao, Q. (2021). Ultrasonic extraction and identification of carp scale collagen. *Journal of Physics: Conference Series*, 1732(1), 012111. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012111>
- Garofalo, S. F., Cavallini, N., Demichelis, F., Savorani, F., Mancini, G., Fino, D., & Tommasi, T. (2023). From tuna viscera to added-value products: A circular approach for fish-waste recovery by green enzymatic hydrolysis. *Food and Bioprocess Processing*, 137, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.11.006>
- Herrera-Franco, G., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Apolo-Masache, B., & Jaya-Montalvo, M. (2020). Research Trends in Geotourism: A Bibliometric Analysis Using the Scopus Database. *Geosciences*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100379>
- Huang, J.-Y., Wong, T.-Y., Tu, T.-Y., Tang, M.-J., Lin, H.-H., & Hsueh, Y.-Y. (2024). Assessment of Tilapia Skin Collagen for Biomedical Research Applications in Comparison with Mammalian Collagen. *Molecules*, 29(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/molecules29020402>
- Igielska-Kalwat, J., Kilian-Pięta, E., & Siedlecki, M. (2025). Application of the upcycling trend using ultrafiltrate of water from the production of collagen from fish skin in hair care cosmetics. *International Journal of Cosmetic Science*, 47(1), 190-204. <https://doi.org/10.1111/ics.13015>
- Isnaini, N., Prajaputra, V., Luthfanna, S. K., & Sari, I. (2024). An update review: Several extraction methods for collagen isolation in vertebrate fish. *BIO Web of Conferences*, 87, 03019. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248703019>
- Jafari, H., Lista, A., Siekapien, M. M., Ghaffari-Bohlouli, P., Nie, L., Alimoradi, H., & Shavandi, A. (2020). Fish Collagen: Extraction, Characterization, and Applications for Biomaterials Engineering. *Polymers*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/polym12102230>
- Jin, H.-X., Xu, H.-P., Li, Y., Zhang, Q.-W., & Xie, H. (2019). Preparation and Evaluation of Peptides with Potential Antioxidant Activity by Microwave Assisted Enzymatic Hydrolysis of Collagen from Sea Cucumber *Acaudina molpadioides* Obtained from Zhejiang Province in China. *Marine Drugs*, 17(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/md17030169>
- Jo, S., Hwangbo, H., Francis, N., Lee, J., Pei, M., & Kim, G. (2025). Fish-derived biomaterials for tissue engineering: Advances in scaffold fabrication and applications in regenerative medicine and cancer therapy. *Theranostics*, 15(12), 5666-5692. <https://doi.org/10.7150/thno.109186>
- Kaewbangkerd, K., Hamzeh, A., & Yongsawatdigul, J. (2023). Ultrasound-assisted extraction of collagen from broiler chicken trachea and its biochemical characterization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, 106372. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106372>
- Korkmaz, K., & Tokur, B. (2022). Optimization of hydrolysis conditions for the production of protein hydrolysates from fish wastes using response surface methodology. *Food Bioscience*, 45, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101312>
- Kristoffersen, K. A., Afseth, N. K., Böcker, U., Dankel, K. R., Rønningen, M. A., Lislelid, A., Ofstad, R., Lindberg, D., & Wubshet, S. G. (2022). Post-enzymatic hydrolysis heat treatment as an essential unit operation for collagen solubilization from poultry by-products. *Food Chemistry*, 382, 132201. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132201>
- Laasri, I., Bakkali, M., Mejias, L., & Laglaoui, A. (2023). Marine collagen: Unveiling the blue resource-extraction techniques and multifaceted applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127253>
- Li, M., Cheng, G., Xiao, S., Jiang, B., Guo, S., & Ding, Y. (2024). Biomimetic Mineralized Hydroxyapatite-Fish-Scale Collagen/Chitosan Nanofibrous Membranes Promote Osteogenesis for Periodontal Tissue Regeneration. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 10(8), 5108-5121. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.4c00569>
- Lionetto, F., & Esposito Corcione, C. (2021). Recent Applications of Biopolymers Derived from Fish Industry Waste in Food Packaging. *Polymers*, 13(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/polym13142337>
- Liu, H., Zhang, H., Wang, K., Qi, L., Guo, Y., Zhang, C., & Xu, Y. (2023). Impact of Ultrasonication on the Self-Assembly Behavior and Gel Properties of Bovine Bone Collagen I. *Molecules*, 28(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/molecules28073096>
- Liu, Z., Yu, M.-Z., Peng, H., Liu, R.-T., Lim, T., Zhang, C.-Q., Zhu, Z.-Z., & Wei, X.-J. (2022). Decellularized tilapia fish skin: A novel candidate for tendon tissue engineering. *Materials Today Bio*, 17, 100488. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100488>
- López-Hortas, L., Rodríguez, P., Díaz-Reinoso, B., Gaspar, M. C., de Sousa, H. C., Braga, M. E. M., & Domínguez, H. (2022). Supercritical fluid extraction as a suitable technology to recover bioactive compounds from flowers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 188, 105652. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105652>
- Lu, W.-C., Chiu, C.-S., Chan, Y.-J., Mulio, A. T., & Li, P.-H. (2023). Characterization and biological properties of marine by-product collagen through ultrasound-assisted extraction. *Aquaculture Reports*, 29, 101514. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101514>
- Mao, Q., Zhuo, Y., Luo, S., Li, J., Hu, F., & Zhao, Q. (2024). Preparation and characterisation of fish skin collagen-chitosan-cinnamon essential oil composite film. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(9), 6087-6101. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17343>
- Matinong, A. M. E., Chisti, Y., Pickering, K. L., & Haverkamp, R. G. (2022). Collagen Extraction from Animal Skin. *Biology*, 11(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/biology11060905>
- Mirzapour-Kouhdasht, A., Sabzipour, F., Taghizadeh, M. S., & Moosavi-Nasab, M. (2019). Physicochemical, rheological, and molecular characterization of colloidal gelatin produced from Common carp by-products using microwave and ultrasound-assisted extraction. *Journal of Texture Studies*, 50(5), 416-425. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12408>
- Mohammad, S. S., Barbosa, M. I. M. J., Gamallo, O., & Junior, J. L. B. (2023). The Production of Bioactive Peptides by Optimization of Enzymatic Hydrolysis Process of Protein from Tilapia Fish Skin Waste (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus 1758) using

- Alcalase 2.4.L. *Current Bioactive Compounds*, 19(10), 18-27. <https://doi.org/10.2174/1573407219666230502154801>
- Moreno-Ricardo, M. A., Gómez-Contreras, P., González-Delgado, Á. D., Hernández-Fernández, J., & Ortega-Toro, R. (2024). Development of films based on chitosan, gelatin and collagen extracted from bocachico scales (*Prochilodus magdalenae*). *Heliyon*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25194>
- Moufaddel, A., Bougrin, K., El Monfalouti, H., & Kartah, B. E. (2024). Unlocking the Potential of Fishery Waste: Acid-Soluble Ultrasound Extraction of Marine Collagen from Sardine Fish Scales. *Chemistry Proceedings*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ecsoc-28-20194>
- Núñez-Tapia, I., Macouzet-Garduño, J., Ramírez-Ruiz, F., Vázquez-Vázquez, F. C., Álvarez-Pérez, M. A., Bucio-Galindo, L., & Piña-Barba, M. C. (2025). Bio-based composite membranes from fish scales: A novel approach to harnessing collagen and hydroxyapatite for tissue engineering applications. *Biomedical Engineering Advances*, 9, 100146. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2025.100146>
- Petcharat, T., Benjakul, S., Karnjanapratum, S., & Nalinanon, S. (2021). Ultrasound-assisted extraction of collagen from clown featherback (*Chitala ornata*) skin: Yield and molecular characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(2), 648-658. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10677>
- Phon, S., Pradana, A. L., & Thanasupsin, S. P. (2023). Recovery of Collagen/Gelatin from Fish Waste with Carbon Dioxide as a Green Solvent: An Optimization and Characterization. *Recycling*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/recycling8020030>
- Prajaputra, V., Isnaini, N., Maryam, S., Ernawati, E., Deliana, F., Haridhi, H. A., Fadli, N., Karina, S., Agustina, S., Nurfadillah, N., Arisa, I. I., Desiyana, L. S., & Bakri, T. K. (2024). Exploring marine collagen: Sustainable sourcing, extraction methods, and cosmetic applications. *South African Journal of Chemical Engineering*, 47(1), 197-211. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.11.006>
- Rajabimashhadi, Z., Gallo, N., Salvatore, L., & Lionetto, F. (2023). Collagen Derived from Fish Industry Waste: Progresses and Challenges. *Polymers*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/polym15030544>
- Rezvani Ghomi, E., Nourbakhsh, N., Akbari Kenari, M., Zare, M., & Ramakrishna, S. (2021). Collagen-based biomaterials for biomedical applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 109(12), 1986-1999. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34881>
- Rusinek, K., Słysz, A., Dębski, T., Siennicka, K., Zołocińska, A., Miszkiewicz-Jasińska, J., Aleksandrowicz, A., & Pojda, Z. (2023). Evaluation of the biocompatibility of fish skin collagen with the mesenchymal stem cells in in vitro cultures. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 21, 22808000231211423. <https://doi.org/10.1177/22808000231211423>
- Senadheera, T. R. L., Dave, D., & Shahidi, F. (2020). Sea Cucumber Derived Type I Collagen: A Comprehensive Review. *Marine Drugs*, 18(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/md18090471>
- Shaik, M. I., Asrul Effendi, N. F., & Sarbon, N. M. (2021). Functional properties of sharpnose stingray (*Dasyatis zugei*) skin collagen by ultrasonication extraction as influenced by organic and inorganic acids. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 35, 102103. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102103>
- Siahaan, E. A., Agusman, Pangestuti, R., Shin, K.-H., & Kim, S.-K. (2022). Potential Cosmetic Active Ingredients Derived from Marine By-Products. *Marine Drugs*, 20(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/md20120734>
- Sivaraman, K., & Shanthi, C. (2021). Role of fish collagen hydrolysate in attenuating inflammation—An in vitro study. *Journal of Food Biochemistry*, 45(9), e13876. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13876>
- Soltanmohammadi, F., Jouyban, A., & Shayanfar, A. (2021). New aspects of deep eutectic solvents: Extraction, pharmaceutical applications, as catalyst and gas capture. *Chemical Papers*, 75(2), 439-453. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01316-w>
- Subhan, F., Hussain, Zohaib, Tauseef, Isfahan, Shehzad, Adeeb, & Wahid, F. (2021). A review on recent advances and applications of fish collagen. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(6), 1027-1037. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1751585>
- Subhan, F., Ikram, M., Shehzad, A., & Ghafoor, A. (2015). Marine Collagen: An Emerging Player in Biomedical applications. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4703-4707. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1652-8>
- Tian, H., Ren, Z., Shi, L., Hao, G., Chen, J., & Weng, W. (2021). Self-assembly characterization of tilapia skin collagen in simulated body fluid with different salt concentrations. *Process Biochemistry*, 108, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.06.013>
- Valipour, F., Rahimabadi, E. Z., & Rostamzad, H. (2023). Preparation and characterization of wound healing hydrogel based on fish skin collagen and chitosan cross-linked by dialdehyde starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126704. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126704>
- Wang, T., Yang, L., Wang, G., Han, L., Chen, K., Liu, P., Xu, S., Li, D., Xie, Z., Mo, X., Wang, L., Liang, H., Liu, X., Zhang, S., & Gao, Y. (2021). Biocompatibility, hemostatic properties, and wound healing evaluation of tilapia skin collagen sponges. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 36(1), 44-58. <https://doi.org/10.1177/0883911520981705>
- Wang, X., Le, B., Zhang, N., Bak, K. H., Zhang, Y., & Fu, Y. (2023). Off-flavour compounds in collagen peptides from fish: Formation, detection and removal. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1543-1563. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15962>
- Widayat, W., Agustini, T. W., Suzery, M., Rahmania, Y. L., Meutia, F., & Tarigan, G. S. I. (2023). Effect of temperature, time, and acid concentration on pH hydrolysis of gelatin with ultrasonic method. *AIP Conference Proceedings*, 2683(1), 030052. <https://doi.org/10.1063/5.0124909>
- Xu, C., Kang, J., Zhao, Y., Zhu, L., Zhang, J., Wei, B., & Wang, H. (2023a). Comparison of carbon dots prepared from collagen peptides using conventional hydrothermal and microwave methods. *New Journal of Chemistry*, 47(6), 3159-3166. <https://doi.org/10.1039/D2NJ04211H>
- Xu, S., Zhao, Y., Song, W., Zhang, C., Wang, Q., Li, R., Shen, Y., Gong, S., Li, M., & Sun, L. (2023b). Improving the Sustainability of Processing By-Products: Extraction and Recent Biological Activities of Collagen Peptides. *Foods*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/foods12101965>
- Yunoki, S., Hatayama, H., Ohyabu, Y., & Kobayashi, K. (2022). Fibril matrices created with collagen from the marine fish barramundi for use in conventional three-dimensional cell culture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.098>
- Zhang, X., Xu, S., Shen, L., & Li, G. (2020). Factors affecting thermal stability of collagen from the aspects of extraction, processing and modification. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00033-0>
- Zhao, G., Zhang, G., Bai, X., Yin, F., Ru, A., Yu, X., Zhao, L., & Zhu, C. (2022). Effects of NaCl-assisted regulation on the emulsifying properties of heat-induced type I collagen. *Food Research International*, 159, 111599. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111599>
- Zhou, Y., Liang, J., Zhang, Y., Zhang, H., Chang, S. K. C., Hong, H., Luo, Y., & Tan, Y. (2024). Silver carp swim bladder collagen derived from deep eutectic solvents: Enhanced solubility against pH and NaCl stresses. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136315. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136315>
- Zhou, Y., Wu, W., Zhang, N., Soladoye, O. P., Zhang, Y., & Fu, Y. (2022). Deep eutectic solvents as new media for green extraction of food proteins: Opportunity and challenges. *Food Research International*, 161, 111842. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111842>