



Procesamiento enzimático de algas: innovaciones y aplicaciones en la industria alimentaria. Una revisión

Enzymatic processing of algae: innovations and applications in the food industry. A review


 <https://doi.org/10.47230/agrosilvicultura.medioambiente.v2.n2.2024.47-60>

Recibido: 23-01-2024


Aceptado: 11-03-2024

Publicado: 20-06-2024


Karol Yanela Revilla Escobar^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0002-8734-1216>


Jhonnatan Placido Aldas Morejon²

 <https://orcid.org/0000-0003-3592-0563>

Bladimir Zamora Basurto³

 <https://orcid.org/0009-0007-3449-2612>

Hernán Humberto Chevez Véliz⁴

 <https://orcid.org/0009-0000-8696-6532>

1. Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas; Esmeraldas, Ecuador.
2. Universidad Nacional de Cuyo; Mendoza, Argentina.
3. Investigador Independiente; Guayaquil, Ecuador.
4. Universidad Técnica Estatal de Quevedo; Quevedo, Ecuador.

Volumen: 2

Número: 2

Año: 2024

Paginación: 47-60

URL: <https://revistas.unesum.edu.ec/agricultura/index.php/ojs/article/view/44>

***Correspondencia autor:** kyrevilla@pucese.edu.ec

RESUMEN

Las algas son organismos acuáticos que pueden ser unicelulares o pluricelulares, y se encuentran en diversos hábitats, desde aguas dulces hasta marinas. Su composición nutricional incluye lípidos, proteínas y carbohidratos, con variaciones según el tipo de alga y las condiciones de cultivo. Por ejemplo, algunas especies son ricas en proteínas o carbohidratos, lo que las hace valiosas en la industria alimentaria. Además, las microalgas son fuente de compuestos bioactivos como carotenoides y ficobiliproteínas, que tienen aplicaciones en cosméticos, suplementos y alimentos funcionales. El procesamiento enzimático se ha destacado como una técnica efectiva para extraer estos compuestos, utilizando enzimas que descomponen las paredes celulares sin dañar los bioactivos. Esta metodología es más sostenible que los métodos tradicionales que emplean disolventes agresivos. Las algas también se utilizan como gelificantes y estabilizantes en productos alimenticios, lo que amplía su aplicación en la industria. En conclusión, las algas marinas representan una rica fuente de nutrientes y compuestos bioactivos, y su procesamiento enzimático permite una extracción eficiente y ecológica de sus beneficios. Esto abre nuevas oportunidades para el desarrollo de productos alimenticios innovadores y sostenibles, combinando nutrición y tecnología en la industria alimentaria.

Palabras clave: Alimentos, Algas marinas, Compuestos bioactivos, Reacción enzimática.

ABSTRACT

Algae are aquatic organisms that can be unicellular or multicellular, and are found in diverse habitats, from freshwater to marine. Their nutritional composition includes lipids, proteins and carbohydrates, with variations depending on the type of algae and culture conditions. For example, some species are rich in proteins or carbohydrates, which makes them valuable in the food industry. In addition, microalgae are a source of bioactive compounds such as carotenoids and phycobiliproteins, which have applications in cosmetics, supplements and functional foods. Enzymatic processing has been highlighted as an effective technique for extracting these compounds, using enzymes that break down the cell walls without damaging the bioactives. This methodology is more sustainable than traditional methods using aggressive solvents. Seaweeds are also used as gelling and stabilizing agents in food products, which broadens their application in industry. In conclusion, seaweeds represent a rich source of nutrients and bioactive compounds, and their enzymatic processing allows efficient and environmentally friendly extraction of their benefits. This opens new opportunities for the development of innovative and sustainable food products, combining nutrition and technology in the food industry.

Keywords: Food, Seaweed, Bioactive compounds, Enzymatic reaction.



Creative Commons Attribution 4.0
International (CC BY 4.0)

Introducción

Las algas marinas se han consumido en Asia desde tiempos remotos, mientras que en países occidentales su principal aplicación ha sido como agente gelificante y co-loide para la industria de alimentos, farmacéutica y cosmética. Las algas son buena fuente de nutrientes como proteínas, vitaminas, minerales y fibra dietética, al respecto, la fibra dietética de algas es particularmente rica en fracción soluble (Quitral et al., 2020).

Si se comparan las algas con vegetales terrestres, se encuentran más componentes beneficiosos para la salud, como ácidos grasos ω -3 y moléculas bioactivas (Sedighi et al., 2019). Las algas sintetizan diversos metabolitos secundarios que presentan actividad antioxidante, antiinflamatoria, anticancerígena y antidiabética. Por lo tanto, las algas se pueden considerar una fuente natural de gran interés debido a que contienen compuestos con numerosas actividades biológicas y pueden ser usadas como ingrediente funcional en muchas aplicaciones industriales como en alimentos funcionales (Mouritsen et al., 2019).

Los organismos marinos como las algas y las microalgas son fuentes bien conocidas de metabolitos secundarios bioactivos que pueden utilizarse para desarrollar productos funcionales. Compuestos como florotaninos, esteroides, ácidos grasos poliinsaturados, lípidos, pigmentos, aminoácidos, polisacáridos sulfatados, terpenoides y alcaloides poseen numerosas propiedades bioactivas en diferentes condiciones (Ortiz et al., 2021). De manera similar a las plantas terrestres, los niveles de compuestos activos sintetizados por los organismos marinos son muy bajos, y su extracción y aislamiento son difíciles debido a la menor eficiencia de extracción asociada con los métodos de extracción convencionales (Asanka-Sanjeewa et al., 2023).

En Estados Unidos, las algas han ganado atención como superalimentos debido a su perfil nutricional completo. Se utilizan en la elaboración de suplementos dietéticos, ba-

tidos verdes, ensaladas y snacks saludables. Empresas innovadoras han comenzado a explorar el uso de algas en productos alimentarios sostenibles, como hamburguesas vegetales y pastas, que aprovechan las propiedades gelificantes y texturizantes de los polisacáridos presentes en las algas (Sedighi et al., 2019).

En la actualidad, las aplicaciones enzimáticas en la ciencia alimentaria se han convertido en estándares de la industria y están disponibles comercialmente debido a que tienen ventajas, que incluyen una alta eficiencia catalítica, especificidad y condiciones de acción suaves durante el proceso de extracción (Wells et al., 2017). Las enzimas utilizadas en aplicaciones comerciales en varios sectores abarcan amilasas, proteasas, lipasas, celulasas, xilanasas, catalasas (Maneein et al., 2018).

En particular, las α -amilasas se destacan por ser particularmente versátiles dentro del sector de las enzimas industriales (Le et al., 2012). Estas enzimas disponibles comercialmente pueden hidrolizar la mayoría de los enlaces peptídicos en una molécula de proteína (es decir, Alcalasa-Proteasa), degradar las paredes celulares y descomponer compuestos similares a la pectina, así como β -glucanos y arabinoxilanos (Viscozyme y Ultraflo), descomponen la celulosa en glucosa, celobiosa y polímeros de glucosa (es decir, Celluclast), hidrolizan los azúcares de malta en glucosa, hidrolizan los enlaces 1, 4 y 1, 6 en el almidón (es decir, Amiloglucosidasa), hidrolizan los enlaces glucosídicos alfa-1, 4 en polisacáridos (es decir, Termamyl) (Rhein-Knudsen et al., 2023).

La extracción asistida por enzimas (EAE) se basa en el principio de destrucción de las células de las algas a través de la hidrólisis por una enzima en condiciones óptimas. Además de producir resultados de extracción superiores, la EAE minimiza el uso de disolventes orgánicos peligrosos. Además, la EAE de la pared celular durante la extracción de algas presenta una alternativa signi-

ficativa al tratamiento mecánico debido a su suavidad y especificidad (Kim et al., 2022; Zhao et al., 2019)

Esta revisión profundiza en el uso de enzimas en el procesamiento de algas para aplicaciones alimentarias. Exploramos los factores que influyen en la extracción de algas, analizamos los parámetros de optimización y presentamos una descripción general de las estrategias para reducir el costo asociado con el procesamiento enzimático para aplicaciones alimentarias que involucran algas.

Metodología

Para el presente trabajo de revisión bibliográfica, se consideraron investigaciones presentes en artículos científicos presentes en revistas las cuales se encuentran en bases de datos como Scimedirect, Scielo, Dialnet, Latindex, Wiley, Pubmed, Redalyc, Scopus. Para la búsqueda de información se utilizaron los siguientes términos: algas, matrices alimentarias, compuestos bioactivos, aplicaciones, enzimas.

Desarrollo

Las algas

Las algas son organismos acuáticos unicelulares y pluricelulares; las últimas pueden ser microalgas y macroalgas, mientras que las unicelulares son únicamente microalgas. Su hábitat varía a diferentes profundidades de aguas dulces, salobres o marinas (Lago-Tagliapietra & Pedrosa-Silva, 2023)

Composición nutricional de las algas

Los principales metabolitos primarios de las algas son lípidos, proteínas, carbohidratos y agua (Tabla 1). Las clorofilas, citocromos, nucleótidos y compuestos que son intermediarios en varias reacciones metabólicas también son metabolitos primarios (Andreeva et al., 2021). La composición bioquímica de las microalgas las hace adecuadas para producir varios compuestos. La proporción de metabolitos primarios depende del tipo de alga y las condiciones de su cultivo (Sudhakar et al., 2019). Por ejemplo, *S. maxima* (*Cyanobacteria*) es una excelente fuente de proteínas (60–71% en peso) (Suganya et al., 2016), *P. cruentum* (*Cyanobacteria*) es una fuente rica de carbohidratos (40–60%) (Suganya et al., 2016), y *S. dimorphus* (*Chlorophyta*) contiene 40% de lípidos (Nigam & Singh, 2011).

Tabla 1.

Valor nutricional de las algas marinas en términos de materia seca (MS)

Género y especie de algas	Proteína	Lípidos totales	Carbohidratos totales	Ceniza	Humedad	Fuente
<i>U. prolifera</i>	26–33	0,20–0,80	43–51	9.20–25.80	5–6	(Li et al., 2018a)
<i>C. racemosa</i> var. <i>peltata</i> (<i>clorofita</i>)	11	1.03	72	10,97	5	(Hao et al., 2019)
<i>S. oligocystum</i>	7–9	3,51–5,66	52–58	20.34–32.45	7	(Praiboon et al., 2018)
<i>S. fusiforme</i> (SF-1)	9–12	3,52–4,61	Dakota del Norte	76,39–80,48	7	(Li et al., 2018b)

Las algas tienen un papel cada vez más importante en el uso directo en productos alimenticios

Por sus beneficios para la salud, pigmentos naturales o como fuente de proteína vegana. Además del valor nutricional, la incorporación de microalgas en matrices alimentarias puede provocar cambios en las propiedades sensoriales (Matos et al., 2022).

Compuestos bioactivos de microalgas y sus aplicaciones

Los diversos compuestos bioactivos producidos por las microalgas exhiben diferentes modos de acción dependiendo del ingrediente activo presente en ellas (Eze et al., 2023). Las microalgas en los últimos años han demostrado ser una fuente importante de alimentos funcionales. Una amplia gama de compuestos bioactivos y sus aplicaciones se encuentran en Tabla 2.

Tabla 2.

Compuestos bioactivos de Algas y sus aplicaciones

Compuesto(s) bioactivo(s)	Fuentes	Aplicaciones	Referencias
Carotenoides: β -caroteno	Botryococcus braunii, Chlamydocapsa sp., Chlorella sorokiniana, Chlorococcum sp.,	Aditivos cosméticos, colorantes alimentarios naturales y alimentos saludables	(Galasso et al., 2019; Vuppaladadiy et al., 2018)
Astaxantina, cantaxantina, violaxantina	Chlorella vulgaris, Chondria striolata,	aditivos alimentarios para acuicultura	(Gong & Bassi, 2016; Cai et al., 2019)
Ficobiliproteínas, por ejemplo, ficocianina, ficoeritrina, porfiridio y clorofila A Proteínas (aminoácidos)	Cianobacterias, Rhodophyta, Cryptomonads, Dolichospermum flos-aquae (anteriormente Anabaena. flos-aquae, Caulerpa racemose, Ulva lactuca	colorantes alimentarios, antioxidantes alimentarios, humanos y plantas Alimentos funcionales, suplementos alimenticios para animales	(Capelli et al., 2019)

Algunas otras aplicaciones

Las algas se pueden utilizar como ingredientes funcionales para mejorar el valor nutricional de los alimentos (Babich et al., 2021). Sin embargo, la mayoría de las algas tienen paredes celulares gruesas, lo que dificulta la extracción de nutrientes y

componentes biológicamente activos. En este sentido, el procesamiento de algas requiere una tecnología adecuada para destruir las células sin la desnaturalización de los componentes activos (Babich et al., 2021). Las algas tienen ventajas innegables en varios campos de aplicación, en la industria alimentaria se emplean como

sustancias gelificantes, espesantes y estabilizadoras como el agar, el alginato y

la carragenina se obtienen de las algas (Sompura et al., 2021).

Tabla 3.

Usos de algas en la producción de alimentos

SL.	Especies de algas	Producto	Acción/Uso
1.	Ascophyllan Darville	Ácido alginico	Se utiliza como estabilizador Agente en el helado
2.	Ecklonia	Alginato de sodio	Espuma de cerveza
3.	Sargazo	Alginato de calcio	Productos lácteos
		Propilenglicol (PEG)	Como agente gelificante utilizado para plástico
4.	Agar	Gelidio	El 90% de la producción de agar se utiliza como alimento en todo el mundo
		Gracilaria	Se utiliza como agente estabilizante y espesante en jaleas y caramelos
		Gladielloa	Utilizado como medio de cultivo en biotecnología Utilizado como laxante suave en productos farmacéuticos
5.	Eucheuma denticulatum	Carragenina	Uso alimentario como algas
6.	Betaphycus gelatinum		Se utiliza para estabilizar

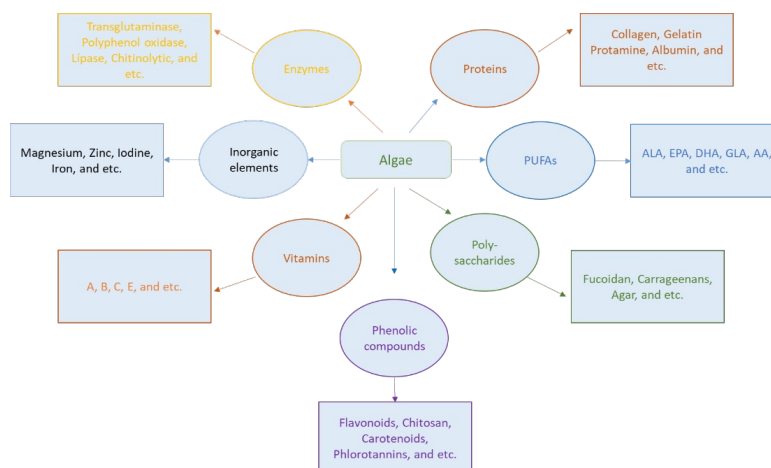
Enzimas que se utilizan en el procesamiento de algas en la industria alimentaria

Las enzimas pueden ser utilizadas para extraer y modificar estructuras moleculares, así como para introducir biomoléculas con ma-

yor estabilidad, que tienen aplicaciones en la industria alimentaria. Abreviaturas: PUFA: ácidos grasos poliinsaturados; ALA: ácido alfa-linolénico; EPA: ácido eicosapentaenoico; DHA: ácido docosahexaenoico; GLA: ácido gamma-linolénico; AA: ácido araquidónico.

Figura 1.

Representación esquemática de productos de algas de alto valor para la industria alimentaria

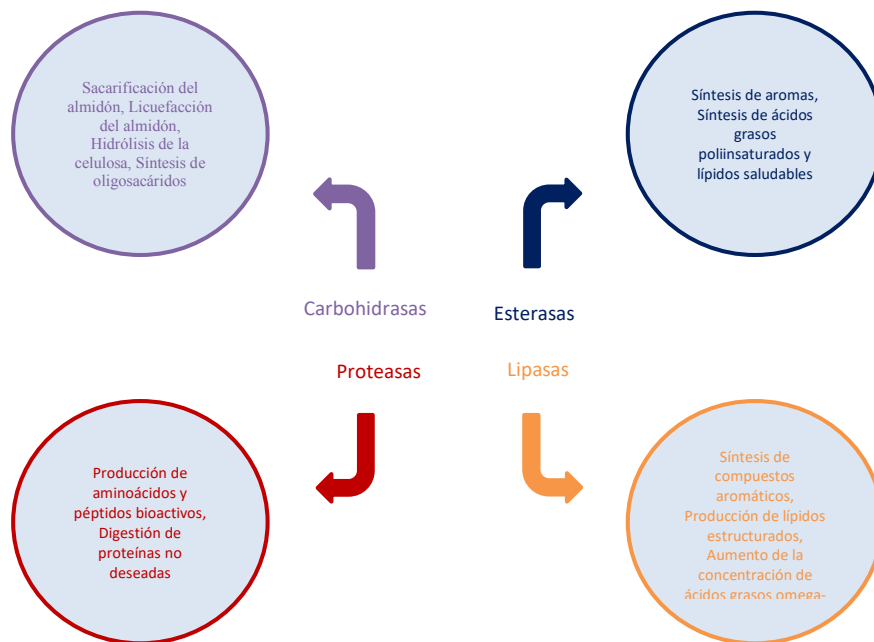


En la Figura 2 se presenta la descripción general de las enzimas que se utilizan habitualmente en el procesamiento de algas en la industria alimentaria. Es necesario mencionar que la identificación de enzimas para con-

vertir los macrometabolitos específicos de las algas en los compuestos deseados para su uso en el procesamiento de alimentos es un desafío importante en el procesamiento enzimático (Parsaeimehr & Ozbay, 2024).

Figura 2.

Descripción general de las enzimas que se utilizan habitualmente en el procesamiento de algas en la industria alimentaria



Extracción enzimática de compuestos bioactivos de algas

El interés en el desarrollo de bioprocesos para la producción o extracción de compuestos bioactivos a partir de fuentes naturales ha crecido significativamente en los últimos años, debido a las potenciales aplicaciones de estos compuestos en las industrias alimentaria y farmacéutica. Las

algas marinas han sido parte integral de la dieta en países asiáticos como China, Japón y Corea. Además, se han utilizado como fuente de fitoquímicos en aplicaciones industriales en países occidentales, incluyendo productos farmacéuticos, nutracéuticos, cosmeceúticos y alimentos funcionales (Wells et al., 2017; Maneein et al., 2018).

Figura 2.

Esquema que ilustra el posible uso de la extracción enzimática para obtener ingredientes activos a partir de algas



La extracción asistida por enzimas de componentes bioactivos

Esta técnica emplea enzimas para descomponer biomoléculas complejas en fragmentos más pequeños, facilitando así la extracción de compuestos bioactivos de las microalgas. Como ya se mencionó que las Enzimas como *celulasas*, *proteasas* y *lipasas* se utilizan para atacar específicamente las paredes celulares y las membranas de las algas, liberando los compuestos bioactivos intracelulares (Siddhnath et al., 2024).

La extracción asistida por enzimas es una técnica sostenible y suave que reemplaza los disolventes agresivos por la precisión de estos catalizadores naturales. Ofrece diversas ventajas, incluyendo alta selectividad, condiciones de reacción suaves y un menor impacto ambiental. En condiciones óptimas de temperatura y pH, enzimas como carbohidrasas y proteasas (por ejemplo, viscozima, termamilo, neutrasa) dismantelan se-

lectivamente los componentes innecesarios de la pared celular, permitiendo la liberación de los bioactivos deseados (Siddhnath et al., 2024).

Investigaciones previas donde han utilizado enzimas celulolíticas (Viscozyme® L, Cellulase, Cellic® HTec2 y Cellic® CTec2) para hidrolizar las algas en un tampón de citrato 50 mM (pH 5,0). Las reacciones se ajustaron a una relación de biomasa de algas:volumen del tampón de 1:30 (p/v). La carga de proteína se mantuvo a 0,1 mg/ml en cada reacción. La hidrólisis se realizó a 50 °C con agitación suave durante 72 h para asegurar una hidrólisis de algas casi máxima. Se incluyeron experimentos de hidrólisis con tampón de citrato sin enzima y etanol (acuoso) al 50% como controles adecuados. La eficiencia de la hidrólisis se midió cuantificando los carbohidratos totales y los fenoles totales en el sobrenadante (hidrolizado) (Blessing & Pletschke, 2024).

Por otro lado, se estudió el efecto del tiempo de extracción (3, 6, 17 y 20 h) sobre los rendimientos de extracción de ulvan para las mezclas de celulasas (Viscozyme L y Cellulysin) y proteasas (Neutrase 0.8L y Flavourzyme). Se utilizó la misma actividad enzimática (300 U g⁻¹ Biomasa) en todas las reacciones. Para proporcionar un mejor contacto de las enzimas con la biomasa, se aplicó una agitación constante de 150 min⁻¹ en todas las reacciones con una incubadora Köttermann 2737 (Köttermann GmbH, Alemania) (Romero et al., 2022).

Enzimas empleadas en la extracción de compuestos bioactivos a partir de biomasa de algas para la industria alimentaria

En la Tabla 4 presenta una lista de enzimas utilizadas en la extracción de compuestos bioactivos de biomasa de algas, un proceso clave para la obtención de ingredientes funcionales en la industria alimentaria. Las enzimas seleccionadas desempeñan un papel fundamental en la descomposición de las estructuras celulares de las algas, facilitando la liberación de compuestos valiosos como polisacáridos, proteínas y antioxidantes. La elección de la enzima adecuada depende de la naturaleza de la biomasa y del tipo de compuesto bioactivo que se desea extraer. Esta información es crucial para optimizar los procesos de extracción y mejorar la calidad y funcionalidad de los productos alimentarios finales.

Tabla 4.

Enzimas empleadas en la extracción de compuestos bioactivos a partir de biomasa de algas para la industria alimentaria

Fuente	Enzima	Extraído compuesto	Concentración de enzimas	Producir	Referencia
Fucus vesiculosus	Viscozima	Fucoxantina	Relación enzima-agua 0.52%. algas-relación agua-5,37% y la incubación tiempo 3,05 h (40 °C)	0,657 mg/g de peso seco	(Shannon & Abu-Ghannam, 2018)
Haematococcus pluvialis	Celulosa y pectinasa	Astaxantina	Un cóctel de celulosa (1,5% v/v), y Pectinasa (0,8%), tiempo de incubación 1 h (40 °C)	60,93 ± 1,27%	(Zhao et al., 2019)
Sargazo duplicado	Termamilo, celulosa y Viscozima	Enzima florotanino celulasa	(7,5 % v/v), e incubación de 3h (temperatura ambiente)	4,45 ± 0,11 mg de floroglucinol equivalente/g peso seco	(Boi et al., 2020)
Undaria pinnatifida	Celuelasto	Fucoidán	0,5 ml de enzima Celluclast mezclada con 2L de (H2O) por 100 gr de peso	97% del total seco contenido de carbohidratos	(Oh et al., 2020)

			seco para 24h (50 °C)		
Gracilaria lemaneiformis	Celulosa y arilsulfatasa	Agar	Agua con 8 U/ml de celulasa y 26,6 U/ mL arilsulfatasa, tiempo de incubación 3h (50 °C)	12,52 ± 0,06%, con gel resistencia de 1521 ± 54,5 g/cm	(Xiao et al., 2019)
Ulva sp.	Protamex	Ulván	6% v/v, tiempo de incubación 3 h (50 °C)	58,4 ± 7,3% peso seco	(Fournière et al., 2019)
Nizamuddinia zanardinii	Alcalase, saborizante, celuclastos y viscozima	Fucoidanos	Alcalasa (5% v/v, pH 8,50 °C, 24 h) Celluclast (5% p/v, pH 4,5, 50 °C, 24 h) Viscozima (5% v/v, pH 4,5, 50 °C, 24 h), o Flavourzyme (5% v/v, pH 7,50 °C, 24 horas)	4,28-5,58 % peso seco	
Macrocystis pyrifera, y condracanto chamissoi	α-amilasa, celulosa, y pectinasa	Proteína	1/10 v/p de sustrato enzimático (1,64 UI/mg de peso seco), tiempo de incubación 10 min (50 °C)	7,39 g/100 g de peso seco en M. pyrifera y 6,35 g/100 g seco peso en C. chamissoi	(Vásquez et al., 2019)

Conclusiones

La revisión detallada sobre el uso de algas marinas y su procesamiento enzimático revela un potencial significativo en la industria alimentaria. Las algas, con su rica composición nutricional y una amplia variedad de compuestos bioactivos, representan una fuente valiosa para el desarrollo de productos alimenticios funcionales y sostenibles. Su perfil nutricional incluye proteínas, lípidos, y carbohidratos, con propiedades bioactivas que ofrecen beneficios para la salud, como efectos antioxidantes, antiinflamatorios y anticancerígenos.

El procesamiento enzimático ha demostrado ser una técnica efectiva y sostenible para la extracción de compuestos bioactivos de las algas. La utilización de enzimas específicas como celulasas, proteasas y lipasas permite la descomposición eficiente de las paredes celulares algales, facilitando la liberación y la recuperación de ingredientes valiosos sin recurrir a disolventes orgánicos agresivos. La técnica no solo mejora la eficiencia de extracción, sino que también contribuye a un enfoque más ecológico en el procesamiento de algas.

En conclusión, las algas marinas y su procesamiento enzimático representan una convergencia prometedora de nutrición y tecnología, abriendo nuevas posibilidades para la innovación alimentaria y la sostenibilidad en la industria. La combinación de sus propiedades nutritivas con métodos avanzados de extracción resalta el potencial transformador de las algas en la creación de productos alimenticios que no solo son beneficiosos para la salud, sino también respetuosos con el medio ambiente.

Bibliografía

- Andreeva, A., Budenkova, E., Babich, O., Sukhikh, S., Dolganyuk, V., Michaud, P., & Ivanova, S. (2021). Influence of Carbohydrate Additives on the Growth Rate of Microalgae Biomass with an Increased Carbohydrate Content. *Mar. Drugs*, 19(381). <https://doi.org/10.3390/md19070381>
- Asanka-Sanjeewa, K., Herath, K., Young-Sang, K., You-Jin, J., & Kim, S.-K. (2023). Enzyme-assisted extraction of bioactive compounds from seaweeds and microalgae. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117266>
- Babich, O., Sukhikh, S., Larina, V., Kalashnikova, O., Kashirskikh, E., Prosekov, A., Noskova, S., Ivanova, S., Fendri, I., Smaoui, S., Abdelkafi, S., Michaud, P., & Dolganyuk, V. (2021). Algae: Study of Edible and Biologically Active Fractions, Their Properties and Applications. *Plants*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/plants11060780>
- Blessing, M., & Pletschke, B. I. (2024). Sequential and enzyme-assisted extraction of algal bioproducts from *Ecklonia maxima*. *Enzyme and Microbial Technology*, 173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enzymictec.2023.110364>
- Cai, X., Chen, Y., Xie, X., Yao, D., Ding, C., & Chen, M. (2019). Astaxanthin prevents against lipopolysaccharide-induced acute lung injury and sepsis via inhibiting activation of MAPK/NF- κ B. *Am J Transl Res*, 15(11), 1884-1894. .
- Capelli, R., Talbott, S., & Ding, L. (2019). Astaxanthin sources: suitability for human health and nutrition. *Function Foods Health Dis.*, 430-445. <https://doi.org/10.31989/ffhd.v9i6.584>.
- Eze, C., Onyejiaka, C., Ihim, S., Ayoka, T., Aduba, C., Ndukwe, J., Nwaiwu, O., & Onyeaka, H. (2023). Bioactive compounds by microalgae and potentials for the management of some human disease conditions. *AIMS Microbiol.*, 9(1), 55-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.3934%2Fmicrobiol.2023004>
- Galasso, C., Gentile, A. O., Noonan, D. M., Sansone, C., & Albin, A. B. (2019). Microalgal derivatives as potential nutraceutical and food supplements for human health: A focus on cancer prevention and interception. *Nutrients*, 11, 1-22. <https://doi.org/10.3390/nu11061226>
- Gong, M., & Bassi, A. (2016). Carotenoides de microalgas: una revisión de los avances recientes. *Biotechnol Adv.*, 34, 1396-1412. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.005>.
- Hao, H., Fu, M., Yan, R., He, B., Li, M., Liu, Q., Zhang, X., & R., H. (2019). Chemical composition and immunostimulatory properties of green alga *Caulerpa racemosa* var *peltata*. *Food Agric. Immunol.*, 30, 937-954. <https://doi.org/10.1080/09540105.2019.1646216>.
- Kim, B., Lee, S. Y., Narasimhan, A., Kim, S., & Oh, Y. (2022). Cell disruption and astaxanthin extraction from *Haematococcus pluvialis*: recent advance. *Bioresour. Technol.*, 343. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126124>
- Lago-Tagliapietra, B., & Pedrosa-Silva, M. T. (2023). Brown algae and their multiple applications as functional ingredient in food production. *Food Research International*(167). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112655>
- Li, J., Yang, F., Jin, L., Wang, Y. J., He, P., & Chen, Y. (2018). Safety and quality of the green tide algal species *Ulva prolifera* for option of human consumption: A nutrition and contamination study. *Chemosphere.*, 210, 1021-1028. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.076>.
- Li, Y., Fu, X., Duan, D., Xu, J., & Gao, X. (2018). Comparison study of bioactive substances and nutritional components of brown algae *Sargassum fusiforme* strains with different vesicle shapes. *J. Appl. Phycol.*, 30. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1543-x>
- Maneein, S., Milledge, J. J., Nielsen, B., & Harvey, P. (2018). A review of seaweed pre-treatment methods for enhanced biofuel production by anaerobic digestion or fermentation. *Fermentation*, 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/fermentation4040100>

- Matos, Â. P., Novelli, E., & Tribuzi, G. (2022). Use of algae as food ingredient: sensory acceptance and commercial products. *Front. Food. Sci. Technol.*, 4. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/frfst.2022.989801>
- Mouritsen, O. G., Rhatigan, P., & Pérez-Lloréns, J. L. (2019). The rise of seaweed gastronomy: phycoastronomy. *Botanica Marina*, 62(3), 195–209. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0041>
- Nigam, P., & Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 37, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>
- Ortiz, J., Aguilera, J. M., Flores, M., Lemus-Mondaca, R., Larrazabal, M. J., Miranda, J. M., & Aubourg, S. P. (2021). Protective Effect of Red Algae (Rhodophyta) Extracts on Essential Dietary Components of Heat-Treated Salmon. *Antioxidants*, 10(7), 1108. <https://doi.org/10.3390/antiox10071108>
- Parsaeimehr, A., & Ozbay, G. (2024). Enzymatic processing of algae for food applications. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103042>
- Praiboon, J., Palakas, S., Noiraksa, T., & Miyashita, K. (2018). Seasonal variation in nutritional composition and anti-proliferative activity of brown seaweed, *Sargassum oligocystum*. *J. Appl. Phycol.*, 30, 101–111. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1248-6>
- Quitral, R., Morales, G., Sepúlveda, L., & Schwartz, M. (2020). Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista chilena de nutrición*, 39(4). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182012000400014>
- Rhein-Knudsen, N., Diego, R.-W., & Jarle-Horn, S. (2023). Extraction of high purity fucoidans from brown seaweeds using cellulases. *International Journal of Biological Macromolecules*, 228. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.261>
- Romero, A. M., Picado-Morales, J., Klose, L., & Liese, A. (2022). Enzyme-Assisted Extraction of Ulvan from the Green Macroalgae *Ulva fenestrata*. *Molecules*, 28(19), 6781. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules28196781>
- Sedighi, M., Jalili, H., Darvish, M., Sadeghi, S., & Ranaei-Siadat, S.-O. (2019). Enzymatic hydrolysis of microalgae proteins using serine proteases: A study to characterize kinetic parameters. *Food Chemistry*, 284, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.111>
- Siddhnath, K., Reddy-Surasani, V., Singh, A., Singh, S., Hauzoukim, Murthy, L., & Gopalbhai-Baraiya, K. (2024). Bioactive compounds from micro algae and its application in foods: a review. *Discover Food*, 4(1), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s44187-024-00096-6>
- Sompura, Y., Chayadevi, H., Vaishnavi, G., Karthik, M., & Ashokkumar, K. (2021). Recent trends of useful algae and their role in food production, healthcare and pharmaceuticals products: A mini-review. *Journal of Current Opinion in Crop Science*, 2(3), 384–390. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.62773/jcocs.v2i3.120>
- Sudhakar, M., Kumar, B., Mathimani, T., & Arunkumar, K. (2019). A review on bioenergy and bioactive compounds from microalgae and macroalgae-sustainable energy perspective. *J. Clean. Prod.*, 228, 1320–1333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.287>
- Suganya, T., Varman, M., & Masjuki, H. R. (2016). Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 55, 909–941. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>
- Vuppaladadiyam, A. K., Prinsen, P., Raheem, A., & Zhao, M. (2018). Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review. *Biofuel Bioprod Bioref.*, 304–324. <https://doi.org/10.1002/bbb.1864>
- Asaduzzaman, M., Rahman Turjo, N., Mou, S. J., Angon, B., & Khan, R. (2024). Bioactive Compounds from Microalgae and their Applications in Functional Foods. 1–27. <https://doi.org/10.22541/essoar.172019468.87953313/v1>
- Bastos, C. F. S., Carpena, M., Chamorro, F., Nogueira-Marques, R., Silva, A., Barroso, M. F., Santos, M., & Prieto, M. A. (2024). Phlorotannins as Bioactive Agents from Brown Algae: Chemical Characterization and Extraction Methods. *IECBM 2024*, 61. <https://doi.org/10.3390/proceedings2024103061>
- Boi, VN, NTM, Cuong, DX, Ha, & HT. (2020). Florotanino antioxidante del alga parda *Sargassum duplicatum*: extracción asistida por enzimas y purificación. *Mundo*, 4, 62–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20200402.17>
- Chini, G., Lauceri, R., Faraloni, C., Silva Benavides, A. M., & Torzillo, G. (2023). Valuable pigments from microalgae: phycobiliproteins, primary carotenoids, and fucoxanthin. In *Photochemical and Photobiological Sciences* (Vol. 22, Issue 8). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00407-3>

- Cotas, J., Leandro, A., Pacheco, D., Gonçalves, A. M. M., & Pereira, L. (2020). A Comprehensive Review of the Nutraceutical and Therapeutic Applications of Red Seaweeds (Rhodophyta). *Life* (Basel, Switzerland), 10(3). <https://doi.org/10.3390/life10030019>
- Dini, I. (2023). The Potential of Algae in the Nutricosmetic Sector. *Molecules*, 28(10). <https://doi.org/10.3390/molecules28104032>
- Eze, C. N., Onyejiaka, C. K., Ihim, S. A., Ayoka, T. O., Aduba, C. C., Ndukwe, J. K., Nwaiwu, O., & Onyeaka, H. (2023). Bioactive compounds by microalgae and potentials for the management of some human disease conditions. *AIMS Microbiology*, 9(1), 55–74. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2023004>
- Fournière, M., Latire, T., Lang, M., Teme, N., Bourgougnon, N., & Bedoux, G. (2019). Producción de fracciones poli y oligosacáridas activas de *Ulva* sp. combinando extracción asistida por enzimas (EAE) y despolimerización. *Metabolitos*, 9, 182. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/metabo9090182>
- Martínez, M., Martínez-González, C. A., Kim, D.-H., Santiesteban-Romero, B., Reyes-Pardo, H., Villaseñor-Zepeda, K. R., Meléndez-Sánchez, E. R., Ramírez-Gamboa, D., Díaz-Zamorano, A. L., Sosa-Hernández, J. E., Coronado-Apodaca, K. G., Gámez-Méndez, A. M., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldivar, R. (2022). Microalgae Bioactive Compounds to Topical Applications Products-A Review. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(11). <https://doi.org/10.3390/molecules27113512>
- Mouritsen, O. G., Rhatigan, P., & Pérez-Lloréns, J. L. (2019). The rise of seaweed gastronomy: phycoastronomy. *Botanica Marina*, 62(3), 195–209. <https://doi.org/10.1515/bot-2018-0041>
- Oh, JY, Kim, EA, Kang, SI, Yang, HW, Ryu, B., Wang, L., Lee, JS, Jean, & YJ. (2020). Efectos protectores del fucoídano aislado del extracto asistido por celuclastos de esporofilas de *Undaria pinnatifida* contra el estrés oxidativo inducido por AAPH modelo de pez cebra in vitro e in vivo. *Moléculas*, 25, 2361. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/moléculas25102361>
- O'Connor, J., Garcia-Vaquero, M., Meaney, S., & Tiwari, B. K. (2022). Bioactive Peptides from Algae: Traditional and Novel Generation Strategies, Structure-Function Relationships, and Bioinformatics as Predictive Tools for Bioactivity. *Marine Drugs*, 20(5). <https://doi.org/10.3390/md20050317>
- Ortiz, J., Aguilera, J. M., Flores, M., Lemus-Mondaca, R., Larrazabal, M. J., Miranda, J. M., & Aubourg, S. P. (2021). Protective Effect of Red Algae (Rhodophyta) Extracts on Essential Dietary Components of Heat-Treated Salmon. *Antioxidants*, 10(7), 1108. <https://doi.org/10.3390/antiox10071108>
- Sathasivam, R., & Ki, J. S. (2018). A review of the biological activities of microalgal carotenoids and their potential use in healthcare and cosmetic industries. *Marine Drugs*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/md16010026>
- Sedighi, M., Jalili, H., Darvish, M., Sadeghi, S., & Ranaei-Siadat, S.-O. (2019). Enzymatic hydrolysis of microalgae proteins using serine proteases: A study to characterize kinetic parameters. *Food Chemistry*, 284, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.111>
- Shannon, E., & Abu-Ghannam, N. (2018). Extracción enzimática de fucoxantina de algas pardas. En *J. Ciencia de los alimentos*, 53, 2195-2204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ijfs.13808>
- Vaish, S., & Pathak, B. (2023). Mangrove synthesized bio-nanomaterial and its applications: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100866>
- Vásquez, V., Martínez, R., & Bernal, C. (2019). Extracción enzimática de proteínas de las algas *Macrocyctis pyrifera* y *Chondracanthus chamissoi*: caracterización de los extractos y su potencial bioactivo. *J. Aplica. Ficol*, 31, 1999-2010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s108110181712y>
- Wells, M. L., Potin, P., Craigie, J. S., Raven, J. A., Merchant, S. S., Helliwell, K. E., Smith, A. G., Camire, M. E., & Brawley, S. H. (2017). Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), 949–982. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0974-5>
- Xiao, Q., Weng, H., Ni, H., Hong, Q., Lin, K., & Xiao, A. (2019). Propiedades fisicoquímicas y de gel del agar extraído mediante enzimas y métodos asistidos por enzimas. *Hidrocoloides alimentarios*, 87, 530-540. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.041>
- Zhao, X., Zhang, X., Liu, H., Zhu, H., & Zhu, Y. (2019). Enzyme-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and its stability and antioxidant activity. *Food Sci. Biotechnol.*, 28, 1637-1647. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10068-019-00608-6>

Cómo citar: Revilla Escobar, K. Y., Aldas Morejon, J. P., Zamora Basurto, B., & Chevez Véliz, H. H. (2024). Procesamiento enzimático de algas: innovaciones y aplicaciones en la industria alimentaria. Una revisión. *Agrosilvicultura Y Medioambiente*, 2(2), 47–60. <https://doi.org/10.47230/agrosilvicultura.medioambiente.v2.n2.2024.47-60>