

ARTÍCULO DE REVISIÓN**Algas de agua dulce: propiedades funcionales y usos en la industria alimentaria****Freshwater algae: functional properties and uses in the food industry**Lelyth Vega¹  y Hubert Arteaga¹ **RESUMEN**

Las algas de agua dulce se considera un recurso muy importante dentro de la industria alimentaria por su alto contenido nutricional y compuestos bioactivos. Este artículo de revisión tiene como objetivo abordar las microalgas y las macroalgas como fuentes de proteínas alternativas/complementarias y la exploración de sus posibles aplicaciones en productos alimenticios. Los principales tipos de microalgas de agua dulce incluyen cianobacterias (*Arthrospira*) y algas verdes (*Chlorella*, *Scenedesmus* y *Haematococcus*), de ellas se describe su morfología, relevancia ecológica y aplicaciones (alimentarias, nutraceuticas e industriales). Así mismo, se detallan los métodos de extracción (proceso convencional, ultrasónica, soxhlet, microondas, CO2 supercrítico, comparando principios, parámetros operativos, rendimientos y beneficios para la industria) y aplicación de sus componentes. Se presenta también la composición proximal y micro nutricional de cada una de las algas (proteínas, carbohidratos, lípidos, cenizas, humedad, fibra, calcio, hierro y otros minerales), junto a sus usos actuales en alimentos funcionales (harinas, bebidas, productos de panadería). Se incorpora el uso de tecnologías ómicas, como herramienta para caracterizar las algas y microalgas, se discuten los impactos del consumo de algas en la salud, su aporte de aminoácidos y vitaminas y sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, tan requeridas por los consumidores hoy en día para la elección de un alimento funcional. Finalmente, a pesar de las bondades que presentan las algas de agua dulce enfrentan desafíos que superar; la caracterización completa de la gran diversidad de especies, las variaciones en la composición de la biomasa y las condiciones de cultivo, las alteraciones en las estructuras funcionales durante los procesos de extracción y purificación, la mejora de sus características sensoriales o métodos para enmascararlos ya que representan un obstáculo de aceptación al incorporarlas en formulaciones alimentarias, para ello se requiere llevar a cabo investigaciones multidisciplinarias y multiactores sobre estos aspectos que permitan a posterior llegar a la transferencia tecnológica.

Palabras clave: Algas de agua dulce, propiedades funcionales, nutraceuticos, extracción de biocompuestos.

ABSTRACT

Freshwater algae are considered a very important resource within the food industry due to their high nutritional content and bioactive compounds. This review article aims to address microalgae and macroalgae as alternative/complementary protein sources and explore their potential applications in food products. The main types of freshwater microalgae include cyanobacteria (*Arthrospira*) and green algae (*Chlorella*, *Scenedesmus*, and *Haematococcus*). Their morphology, ecological relevance, and applications (food, nutraceutical, and industrial) are described. Likewise, the extraction methods (conventional, ultrasonic, Soxhlet, microwave, and supercritical CO2 processes, comparing principles, operating parameters, yields, and benefits for the industry) and the application of their components are detailed. The proximate and micronutrient composition of each of the algae (proteins, carbohydrates, lipids, ash, moisture, fiber, calcium, iron, and other minerals) is also presented, along with their current uses in functional foods (flours, beverages, bakery products). The use of omics technologies is incorporated as a tool to characterize algae and microalgae, and the impacts of algae consumption on health, their

¹ Universidad Nacional de Jaén 1, Perú, Email: keiko.vega@est.unj.edu.pe,

¹ Universidad Nacional de Jaén 1, Perú, Email: hubert.arteaga@unj.edu.pe

Algas de agua dulce

contribution of amino acids and vitamins, and their antioxidant and anti-inflammatory properties, so in demand by consumers today when choosing a functional food, are discussed. Finally, despite the benefits presented by freshwater algae, they face challenges that must be overcome; the complete characterization of the great diversity of species, variations in biomass composition and cultivation conditions, alterations in functional structures during extraction and purification processes, the improvement of their sensory characteristics or methods to mask them since they represent an obstacle to acceptance when incorporating them into food formulations, for this it is necessary to carry out multidisciplinary and multi-actor research on these aspects that will later allow to reach technological transfer.

Keywords: Freshwater algae, functional properties, nutraceuticals, biocompounds extraction

* Autor para correspondencia

INTRODUCCIÓN

Las algas de agua dulce comestibles comprenden principalmente cianobacterias y microalgas eucariotas, que aportan nutrientes y compuestos bioactivos al ecosistema. Se estima que existen más de 122 000 especies de algas en el mundo, de las cuales más de mil habitan en aguas continentales (Webb et al., 2023). Estas microalgas que carecen de raíces, tallos y hojas tradicionales actúan como fabricantes de células que a su vez son ricas en pigmentos, lípidos polinsaturados, proteínas y polisacáridos funcionales, por lo cual son consideradas como alimento suplementario (Jadhav et al., 2024).

A medida que la población mundial va creciendo, la demanda por el consumo de alimentos funcionales y nutricionales está en aumento, por ello explorar nuevas fuentes de alimento es de gran importancia (Rivera y Requena, 2020); (Wu et al., 2023). Una alternativa funcional son las algas de agua dulce que por lo general crecen principalmente en lagunas (Díaz-Godínez et al., 2024). Esta biomasa es un recurso potencial para desarrollar alimentos, extraer nutraceuticos y elaborar suplementos alimenticios, debido a que presentan alto contenido proteico (50–70% b.s.) y son fuente de aminoácidos esenciales como la lisina y leucina (Webb et al., 2023). Además, presenta compuestos bioactivos que pueden ser aprovechados (Prihanto et al., 2022).

No obstante, el uso de algas en la formulación de productos alimenticios y bebidas funcionales innovadoras aún es incipiente, al igual que los estudios sobre la aceptación y percepción de los consumidores frente a este tipo de ingredientes en los alimentos (Ayub et al., 2025). La mayoría de investigaciones se centran principalmente en la extracción y caracterización de compuestos derivados de algas, como pigmentos, proteínas, polisacáridos o lípidos, muchos de los cuales ya se encuentran disponibles en el mercado, pero aún no se aprovechan plenamente en la industria alimentaria.

Por ello, esta revisión aborda el estado actual del conocimiento sobre las algas de agua dulce en cuanto a sus tipos, métodos de extracción de compuestos, propiedades funcionales, tecnologías ómicas aplicadas

en las algas de agua dulce y efectos en nutrición y salud del consumo de algas. Para ello, se realizó una selección de artículos científicos publicados entre 2008 y 2025, escritos en inglés y español de bases de datos como SciELO, Web of Science, Scopus y ScienceDirect.

1. Tipos de algas de agua dulce

Dentro de los tipos de algas de agua dulce se calcula que hay cerca de diez millones de especies de algas, los cuales se clasifican dentro de dos amplios grupos: microalgas y macroalgas. En términos de clasificación general, estas pueden agruparse en once filos principales: cianofitas, clorofitas, rodofitas, glaucofitas, euglenófitas, clorarachnifitas, carofitas, criptofitas, haptofitas, heterocontofitas y dinofitas (Sharma et al., 2019).

Las microalgas de agua dulce comprenden varios grupos taxonómicos: Cianobacterias (algas verde-azules) como *Arthrospira* (*espirulina*), *Nostoc*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*; Clorófitas (algas verdes) como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Spirogyra*, *Haematococcus*; *Diatomeas* (*Bacillariophyceae*) como *Asterionella*; Cromófitas; y otros menos comunes (*Euglena*, *Glaucophyta*). Históricamente, solo unas pocas especies silvestres han sido domesticadas para consumo: por ejemplo, *Arthrospira platensis* (*espirulina*) y *Chlorella vulgaris*, junto a *Aphanizomenon flos-aquae* (AFA), son las microalgas comerciales dominantes por su elevado valor nutricional (Wang et al., 2021)

De las microalgas de agua dulce identificadas, numerosos investigadores se centran únicamente en examinar su fisiología y su reacción ante cambios ambientales mas no en sus propiedades funcionales o compuestos nutraceuticos y usos en la industria alimentaria. Como resultado, todavía existen muchas especies de microalgas de agua dulce que no han sido estudiadas (Prihanto et al. 2022)

En la industria alimentaria destacan varias algas de agua dulce comestibles. Las cianobacterias filamentosas como *Arthrospira platensis* (comúnmente “*espirulina*”) y *Aphanizomenon flos-aquae* ofrecen alto contenido proteico (>60% b.s.) y pigmentos (ficocianina) (Scoglio et al., 2024). Las algas verdes unicelulares como *Chlorella vulgaris* son ricas en proteína (50–60% b.s.) utilizadas como suplementos antioxidantes (Abreu et al., 2023). Las cianobacterias coloniales (por ejemplo, *Nostoc commune* o “*cushuro*”) forman esferas gelatinosas y se consumen secas en sopas tradicionales de los Andes, estas tienen un contenido proteico de 25–30% b.s., 62% de carbohidratos siendo esta un alga prometedora para la industria alimentaria (Ponce, 2014). También se utilizan algas verdes filamentosas como *Spirogyra varians*, recolectada en ambientes dulceacuícolas, rica en carbohidratos y proteínas (Tipnee et al., 2015). Estas especies aportan compuestos funcionales (proteínas, fibras, vitaminas y antioxidantes) y se procesan en formas pulverizadas, extractos o ingredientes alimentarios.

Algas de agua dulce

Más allá de la composición química, las algas de agua dulce exhiben gran diversidad morfológica: hay formas filamentosas como por ejemplo *Spirogyra*, *Cladophora*, unicelulares flageladas como *Chlamydomonas*, entre otras algas rojas filamentosas (*Batrachospermum*). Estas variaciones influyen tanto en su cultivo y procesamiento (Michalak y Messyasz, 2020). En la tabla 1 se presentan las especies representativas de algas de agua dulce y sus principales características.

Tabla 1

Especies representativas de algas de agua dulce.

Nombre común	Especie (científica)	Morfología	Hábitat	Usos en la industria	Otros usos recientes	Ventaja	Referencia
Espirulina (Arthrospira)	Arthrospira platensis, A. máxima	Filamentosas en espiral	Lagos	Suplemento dietético y funcional	Biosensores para contaminantes ambientales	Alto contenido proteico y ficocianina	(Nikolova et al., 2024)
Chlorella	Chlorella vulgaris, C. sorokiniana	Unicelular esférica	Estanques y lagunas	Antioxidante	NR	Fuente de vitamina B12	(Abreu et al., 2023)
Aphanizomenon flos-aquae (AFA)	Aphanizomenon flos-aquae	Filamentosas, nodular	Fuentes de agua dulce	Suplemento nutricional	Biomasa	NR	(Scoglio et al., 2024)
Cushuro (Nostoc)	Nostoc commune, N. sphaericum	Esféricas gelatinosas	Lagos en orillas	Nutrición ancestral	NR	Combatir anemia	(Ponce, 2014)
Spirogyra	Spirogyra varians	Filamentosa sin ramificar	Arroyos de corriente lenta	Ingrediente alimentario funcional	Biocombustible	Alto contenido de pigmentos y carbohidratos	(Tipnee et al., 2015)
Euglenofita	Euglena gracilis	Unicelular flagelada	Sedimentos de agua dulce	Aditivo alimentario	Extracción de paramilón	Alto contenido de paramilón y vitaminas	(Zhang et al., 2023)
Haematococcus (rojo)	Haematococcus pluvialis	Unicelular	Fuentes de agua dulce expuestas al sol	Aplicaciones médicas	NR	Protección celular antioxidante	(Gu et al., 2024)
Dunaliella	Dunaliella salina	Unicelular	Aguas con clima cálido	Uso farmacéutico	NR	Alto en β-caroteno y lípidos	(Ampofo y Abbey, 2022)

Nota. No reportado (NR)

2. Métodos de extracción de compuestos bioactivos

Las microalgas poseen una pared celular gruesa, lo que limita la liberación de sus compuestos bioactivos debido a la rigidez de su matriz. Por ello, es crucial seleccionar métodos de pretratamiento y extracción adecuados para obtener lípidos y otros compuestos de las microalgas y preservar su bioactividad (Nguyen

et al., 2024). Tradicionalmente, las algas han sido utilizadas como fuente para la extracción de β -caroteno, un compuesto esencial para la salud visual y el fortalecimiento del sistema inmunológico, su relevancia en aplicaciones industriales responde a su valor nutricional y la eficiencia de producción que ofrecen frente a otras fuentes tradicionales (Ilyas et al., 2023). Se han empleado métodos tradicionales como la extracción Soxhlet, la extracción Folch y la extracción Bligh-Dyer para la obtención de lípidos (Cotas et al., 2020). Aunque estos métodos son generalmente fáciles de operar y económicos, lo que favorece su uso, presentan desventajas en su alto consumo de reactivos orgánicos que impacta en el medioambiente, y prolongados tiempos de extracción (Zhou et al., 2022).

2.1. Proceso convencional para la extracción de lípidos de algas de agua dulce

Dentro de los tipos de extracción para lípidos esta la disrupción mecánica o térmica de biomasa con solventes (agua, etanol y hexano) (Jadhav et al., 2024). La extracción Soxhlet (SE) es una técnica que mueve los componentes parcialmente solubles de una muestra sólida a una fase líquida (solvente) mediante un extractor Soxhlet. Los lípidos neutros se extraen utilizando solventes no polares como el hexano (Baumgardt et al., 2015). Además, el uso de disolventes más polares podría mejorar el rendimiento de la extracción de microalgas, facilitando así la recuperación de lípidos y pigmentos complejos.

2.2. Extracción asistida por ultrasonidos

La extracción por ultrasonidos se destaca frente a otros métodos de extracción en varios aspectos, incluyendo su alto rendimiento, fiabilidad, seguridad, facilidad de uso y respeto por el medio ambiente (Tavakoli et al., 2021).

El ultrasonido implica aplicar ondas ultrasónicas en un rango entre 20 kHz a 10 MHz caracterizado según la intensidad. Las microalgas tienen una pared celular muy gruesa que bloquea la liberación de lípidos dentro de la célula. Los procesos de extracción convencionales como la extracción por solventes y el prensado mecánico producen menos lípidos en comparación con el proceso de extracción asistido por ultrasonido (Mubarak et al., 2015).

La extracción asistida por ultrasonido, induce variaciones de presión en el medio líquido que provocan la formación de burbujas, ya sea a partir del gas contenido en las partículas sólidas o por burbujas preexistentes. Estas burbujas crecen progresivamente durante los ciclos de compresión, una vez que

Algas de agua dulce

alcanzan un tamaño tal que la energía ultrasónica ya no es suficiente para contener los vapores estas colapsan (Jadhav et al., 2024).

2.3. Extracción por alta presión

El proceso de extracción con líquidos presurizados (PLE) ha sido ampliamente utilizado para obtener bioactivos de diversas cepas de microalgas. En comparación con los métodos de extra¹⁰⁹ convencionales, esta técnica presenta varias ventajas, como una transferencia de masa más eficiente gracias a las condiciones específicas de extracción y una mayor rapidez en el proceso, utilizando volúmenes menores de disolvente. El empleo de disolventes líquidos a altas temperaturas reduce su viscosidad, lo que facilita su penetración en la matriz celular y, en última instancia, mejora tanto el rendimiento como la cinética de la extracción (Jadhav et al., 2024).

La extracción a ultra alta presión (UHPE) es una variante de la extracción con líquidos presurizados, donde la presión puede alcanzar hasta 800 MPa, un nivel notablemente elevado. Esta aplicación de presiones extremas puede debilitar las estructuras celulares de las algas, eliminando así la necesidad de realizar una disrupción celular previa (Gallego et al., 2021). A continuación, en la tabla 2 se presenta los métodos de extracción en diferentes tipos de algas.

Tabla 2

Principales métodos de extracción aplicados a algas de agua dulce.

Método	Tipo de alga	Principio	Compuestos	Condicione s	Ventajas	Referencia
UAE (extracción asistida por ultrasonidos)	<i>Chlorella vulgaris</i>	Cavitación ultrasónica rompe células	Proteínas, pigmentos y fenoles	20 kHz a 10 MHz	Rápido, alta eficiencia, poco solvente	(Santana et al., 2012); (Wetterwald et al., 2023)
Solventes convencionales (maceración/Soxhlet)	<i>Chlorella</i> spp, <i>Spirulina platensis</i>	Extracción lipofílica por solvente orgánico	Lípidos, clorofilas, carotenoides y fenoles	60–80 °C durante 12–24 h a baja velocidad	Extrae eficientemente lípidos, pigmentos y fenoles	(Shen et al., 2023)
Microondas (MAE)	<i>Chlorella vulgaris</i>	Ruptura celular por microondas	Carotenoides y lípidos	60 °C, 300 W, 14 min con etanol 90% (22 mL/g biomasa	Muy rápido y eficiente	(Ioulia et al., 2023)
CO ₂ supercrítico (SFE)	<i>Haematococcus pluvialis</i> (fase roja)	Extracción apolar con CO ₂ supercrítico	Antioxidante s y pigmentos	Glicerol (1:2) + 21% agua, 30 s a 7500 rpm	Ecológico y selectivo. Solventes biodegradables , no tóxicos	(Kamil et al., 2025)

Enzimático	<i>Padina,</i> <i>Chlamydomona</i> <i>s</i>	Enzimas específicas	Polisacáridos y proteínas	pH ~5–8, T 30–60°C	Aumento recuperación de polisacáridos y fenoles respecto a agua/etanol	(Nguyen et al., 2024)
------------	---	------------------------	------------------------------	-----------------------	--	--------------------------

3. Propiedades funcionales

Se estima que alrededor de 1 de cada 9 personas en el mundo padece desnutrición, siendo un factor muy relevante, por ello es necesario explorar nuevas fuentes de alimento para afrontar esta creciente problemática (Aswathy et al., 2025). Al promover el uso de microalgas como una nueva fuente de alimentos, se presenta la oportunidad de incrementar el suministro de estos productos esenciales de manera más eficiente y sostenible desde el punto de vista ambiental.

Investigaciones recientes sobre algas (tanto macroalgas y microalgas) como fuente emergente de proteínas, incluyendo las especies productoras de proteínas más relevantes y las estrategias para mejorar el contenido proteico en las materias primas de algas son consideradas una nueva fuente de alimento con alto valor nutricional. Muchos tipos de algas son alimentos nutricionalmente completos, considerándose una fuente de proteínas muy importante y su rendimiento supera al de la mayoría de los cultivos vegetales, y existe un creciente conjunto de herramientas para desarrollar cepas mejoradas de algas (Lucas y Brunner, 2024).

Las algas de agua dulce son ricas en proteínas de alta calidad (contienen todos los aminoácidos esenciales), fibras, minerales y pigmentos antioxidantes (ficocianina, clorofila, carotenoides) (Chiellini et al., 2022). Por ejemplo, *Spirulina* aporta hasta 60–70% de proteína en base seca y es fuente de ácidos grasos insaturados y vitaminas. *Chlorella* contiene 60% proteína en base seca y carotenoides como la luteína (Podgórska-Kryszczuk., 2024). *Nostoc (cushuro)* aporta 25% proteína en base seca, minerales y vitaminas (calcio 1076 mg/100g, vitamina A) (Ponce, 2014). Estos componentes confieren acciones antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladores. Por ejemplo, la ficocianina de *Spirulina* actúa como colorante natural y tiene efecto antioxidante; los carotenoides (β -caroteno, astaxantina) neutralizan radicales libres y protegen al organismo (Ayub et al., 2025).

Numerosos estudios han demostrado que los compuestos bioactivos presentes en las algas, como la ficocianina de *Spirulina* y los polisacáridos sulfatados de *Chlorella*, poseen potentes efectos antioxidantes. En una revisión sistemática de *Spirulina* sobre estrés oxidativo en atletas, se encontró una reducción significativa de marcadores de peroxidación lipídica (MDA 14 %, $p < 0.05$) y un aumento de

Algas de agua dulce

la capacidad antioxidante total (TEAC 18 %) tras 8 semanas de suplementación (Díaz-Godínez et al., 2024). Asimismo, estudios in vitro e in vivo con extractos de *Chlorella* muestran inhibición de las citocinas proinflamatorias TNF- α e IL-6 hasta en un 40 % en modelos de colitis experimental, lo que sugiere un potencial antiinflamatorio en enfermedades gastrointestinales (Podgórska-Kryszczuk., 2024). La ficocianina, una biliproteína de color azul aislada de *Spirulina platensis*, ha mostrado una alta capacidad para neutralizar radicales libres en ensayos DPPH y ABTS, alcanzando más del 90 % de

inhibición a 0.5 mg/ml (Armaini et al., 2024). Asimismo, este pigmento ejerce, de forma dependiente de la dosis, un efecto inhibidor sobre las enzimas proinflamatorias lipoxigenasa (LOX) y ciclooxigenasa-2 (COX-2) en cultivos celulares, lo que refrenda su doble acción antioxidante y antiinflamatoria en formulaciones nutraceuticas (Romay et al., 2025). Por otro lado, una revisión reveló que, en modelos in vivo, la ficocianina reduce hasta un 40 % los niveles de malondialdehído (MDA) y atenúa la expresión de iNOS y TNF- α , al tiempo que incrementa la actividad de enzimas antioxidantes endógenas como el superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT) (Romay et al., 2003). Estos resultados sitúan a la ficocianina como un ingrediente prometedor para atenuar el estrés oxidativo sistémico y la inflamación crónica. A continuación, en la tabla 3 se muestran las diferentes algas de agua dulce y su composición.

Tabla 3

Composición de las microalgas y macroalgas.

Grupo	Proteína	Carbohidratos		Grasa	Cenizas	Humedad	Fibra	Calcio	Lípidos	Minerales	Hierro	Referencia
<i>Nostoc commune, N. sphaericum</i>	28.18 ± 0.33%	62.07 ± 0.69%	±	0.71 ± 0.02 %	7.68 ± 0.10 %	0.22 ± 0.01 %	0.22 ± 0.01 %	377.80 ± 1.43 mg/100 g	NR	NR	4.76 ± 0.08 mg/100 g	(Méndez-Ancca et al., 2023)
<i>Spirogyra varians</i>	12.0% y 24	42.8% y 60.0%	y	NR	NR	NR	NR	445.9 ± 0.1 mg/100 g	14.8 % y 21.0 %	NR	NR	(Tipnee et al., 2015)
<i>Chlorella vulgaris</i>	32.99 ± 2.1 mg g ⁻¹ (b.s)	20 %		45 %	5 %	NR	20 %	NR	4 – 9%	5 %	NR	(Noura et al., 2020)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	10 – 35 %	1 - 7 %		NR	NR	NR	15 – 35 %	NR	2 – 3 %	NR	NR	(Nur et al., 2021)
<i>Espirulina, AFA</i>	55-70%	15-25%		6-9%	NR	NR	8-10%	NR	NR	NR	NR	(Podgórska-Kryszczuk., 2024)
<i>Dunaliella salina</i>	39.14 g/100 g	27.0 g/100 g		NR	NR	NR	NR	NR	18.0 g/100 g	NR	NR	(Joana et al., 2023)

<i>Oedogonium sp</i>	15 – 20 %	50 – 60 %	5 – 7 %	15 – 25 %	NR	NR	NR	NR	NR	NR	(Lawton et al., 2013)
----------------------	-----------	-----------	---------	-----------	----	----	----	----	----	----	-----------------------

Nota: No reportado (NR)

4. Ómicas aplicadas a las algas

Los avances acelerados en las tecnologías ómicas están desbloqueando el potencial multifuncional de las microalgas como materias primas para el uso en la industria alimentaria, con aplicaciones prometedoras, paralelamente, las microalgas se perfilan como plataformas atractivas para su aprovechamiento (Guarnieri y Pienkos, 2014).

La proteómica es un campo complejo debido a la necesidad de analizar y clasificar las firmas proteicas de un genoma, equipos como la espectrometría de masas (LC-MS-MS y MALDI-TOF/TOF) son centrales en la proteómica moderna. Sin embargo, los altos costos asociados con las instalaciones proteómicas, incluyendo el software, las bases de datos y la necesidad de personal especializado, limitan su adopción generalizada, especialmente en países en desarrollo (Lauritano et al., 2019). Además, la proteómica nos brinda la oportunidad de investigar las variaciones en los productos finales de la regulación génica, es decir, las proteínas, a compartir desde la transcripción hasta las modificaciones postraduccionales. Este enfoque, complementario al análisis transcriptómica, se ha utilizado para estudiar las respuestas de *Nannochloropsis* oceánica ante la inanición de nitrógeno a largo plazo (Garnier et al., 2014).

Así mismo, las microalgas albergan una variedad de metabolitos cuyas propiedades y relaciones aún no se han comprendido completamente, debido a la complejidad de sus procesos metabólicos (Hughes et al., 2021). La metabolómica se dedica al análisis de estos metabolitos y sus vías de acción dentro de las células. A través de la metabolómica, es posible obtener una instantánea del fenotipo de las microalgas, lo que permite esclarecer los mecanismos de las vías metabólicas. Además, esta técnica facilita la comparación de los metabolitos entre la especie silvestre y sus mutantes (Gowda y Djukovic, 2014).

La lipidómica es una rama de la metabolómica que se centra en la identificación y diferenciación de diversas clases de lípidos, así como en las moléculas que interactúan con ellos (Ivanova et al., 2009). Las técnicas más comunes para llevar a cabo estudios en lipidómica son la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS) y los métodos quimiométricos combinados con análisis multivariante (Su et al., 2012). Comprender la dinámica de la lipidómica en respuesta a diferentes señales ambientales puede proporcionar información valiosa sobre el metabolismo lipídico de las microalgas y

Algas de agua dulce

facilitar la manipulación de su rendimiento y perfil lipídico para optimizar la producción de biocombustibles (Arora et al., 2018).

El progreso en las tecnologías ómicas, la ingeniería metabólica y la biología de sistemas ha fomentado la concepción de las algas como fábricas de células microbianas (Sirohi et al., 2021). Dado que las algas constituyen un grupo altamente diverso de organismos acuáticos, son capaces de producir una amplia variedad de bioproductos. Los recientes avances en genómica, proteómica y transcriptómica ¹¹³ posicionado a las algas como una "materia prima versátil", con aplicaciones en nutracéuticos, biocombustibles, ciencia de materiales y en el ámbito biomédico (Guarnieri y Pienkos, 2014). A continuación, en la tabla 4 se muestra las ómicas principales para extracción de compuestos de algas de agua dulce.

Tabla 4

Ejemplos de aplicaciones ómicas en algas de agua dulce

Ómicas	Alga	Objetivo	Condiciones	Compuestos	Limitaciones	Referencia
Metabolómica	<i>Euglena gracilis</i>	Perfil de metabolitos secundar	Extracción metanólica, LC-MS	Astaxantina y carotenos medidos (%)	Rendimiento en cultivo	(Sun et al., 2022)
Proteómica	<i>Haematococcus pluvialis</i>	Cuantificar enzimas de síntesis de astaxantina	Inducción roja: 30 °C, por 72 h; extracción con 50 mM Tris-HCl	Genes VcMID (det. sexualidad)	Evolución de germen	(Irvani et al., 2024)
Lipidómica	<i>Nannochloropsis limnetica</i>	Contenido total de lípidos	Cultivo con variación de CO ₂ y N	Omega-3	NR	(Couto et al., 2022)

Nota: No reportado (NR)

5. Impactos en la nutrición y salud por el consumo de algas

5.1. Perfil de aminoácidos, vitaminas y micronutrientes esenciales

El análisis de aminoácidos de *Spirulina* revela una composición balanceada con todos los aminoácidos esenciales, incluyendo leucina (8.6 g/100 g), lisina (5.5 g/100 g) y fenilalanina (4.2 g/100 g), lo cual la posiciona como fuente de proteína vegetal de alta calidad comparable a la de la leche y los huevos (Podgórska-Kryszczuk., 2024). Además, *Chlorella vulgaris* contiene niveles significativos de vitaminas del complejo B (B₁₂ hasta 66 µg/100 g en algunos lotes), vitamina C (10–15 mg/100 g) y provitamina A (β-caroteno, 2 mg/100 g), así como minerales como hierro (28 mg/100 g) y magnesio (315 mg/100 g), superando a muchas verduras de hoja verde en concentración de micronutrientes (Podgórska-Kryszczuk., 2024). Estas características la hacen particularmente útil para poblaciones con riesgo de deficiencias, como vegetarianos, mujeres embarazadas o personas con anemia ferropénica, al mejorar la biodisponibilidad de hierro y zinc y complementar dietas bajas en fuentes animales.

5.2.Efectos inmunomoduladores, salud intestinal y neuro protección

Las algas de agua dulce han demostrado que ejercen profundos efectos inmunomoduladores, reforzando las defensas de nuestro cuerpo de manera más natural (Naik et al., 2024). Por ejemplo, los β -glucanos actúa como patrones moleculares asociados a patógenos (PAMP) y pueden identificarse de forma no específica mediante receptores de reconocimiento de patrones (PRR) en la superficie de las células del sistema inmunitario innato (Comer et al., 2021). Mientras que la suplementación con *Chlorella* ha mostrado aumentar células Natural Killer (NK) y marcadores de inmunidad en ciertas condiciones. Sus compuestos antiinflamatorios pueden ayudar a regular procesos inmunitarios (Díaz-Godínez et al., 2024 y Karthigee et al., 2023).

Además de sus beneficios metabólicos, las algas de agua dulce ejercen modulaciones en el sistema inmunitario y en la salud intestinal. Un extracto de *Aphanizomenon flos-aquae* (Klamin®) mostró en cultivos de músculo liso colónico humano un efecto espasmolítico significativo, mediado por β -feniletilamina que activa receptores de un antagonista del receptor de trazas de amina (TAAR1) y promueve la liberación de serotonina, modulando la motilidad intestinal (Amato et al., 2021). En modelos animales de obesidad, la suplementación con extracto *Aphanizomenon flos-aquae* (AFA) redujo la resistencia a la insulina, la inflamación hepática y la deposición de β -amiloide en cerebro, sugiriendo efectos neuro protectores y antiinflamatorios sistémicos (Galizzi et al., 2023). Finalmente, péptidos bioactivos de *Chlorella pyrenoidosa* han demostrado alterar favorablemente la composición del microbioma intestinal en ratones con dieta alta en grasas, incrementando bacterias productoras de butirato y mejorando marcadores de permeabilidad intestinal (Liu et al., 2024). Estos hallazgos sustentan el potencial de las algas como moduladores de la inmunidad y la salud gastrointestinal, con implicaciones en trastornos inflamatorios y neurodegenerativos.

5.3.Soporte metabólico / antidiabético

Algunos compuestos algales inhiben enzimas digestivas de carbohidratos (amilasa, glucosidasa) y modulan el microbiota intestinal hacia bacterias beneficiosas, contribuyendo al control de glucemias postprandiales. Ensayos indican efectos hipoglucémicos modestos de extractos de *Chlorella* y algas pardas en humanos (Wu et al., 2023).

La diabetes, considerada un síndrome metabólico complejo, puede ser modulada mediante el uso de fármacos nutricionales que ofrecen beneficios terapéuticos complementarios

Algas de agua dulce

(Kim et al., 2008). La *espirulina*, una especie de alga rica en nutrientes bioactivos de alto valor funcional, tiene la capacidad para promover el equilibrio glucémico y apoyar la salud metabólica de forma natural (Ziyaei et al., 2023).

5.4.Salud cardiovascular

El elevado contenido de ácidos grasos omega-3 en las microalgas, especialmente el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el ácido docosahexaenoico (DHA) tiene un gran potencial para mantener la salud cardiovascular (Begum et al., 2024). Investigaciones recientes han demostrado que los suplementos de omega-3 obtenidos de microalgas son tan efectivos como los suplementos tradicionales de aceite de pescado en la reducción de los niveles de triglicéridos, la mejora del perfil lipídico y la disminución de la presión arterial (Valado y Pereira, 2023). Además, estos compuestos han mostrado resultados prometedores en la reducción de la inflamación, la mejora de la función endotelial y la prevención de la aterosclerosis, lo que contribuye a disminuir el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Martínez et al., 2018). A continuación, en la tabla 5 se muestra el uso de algas dulce en diferentes alimentos y sus beneficios.

Tabla 5

Usos de las algas de agua dulce en la industria alimentaria

Alga	Modo de incorporación	de Producto alimentario	Propiedad funcional	Perfil sensorial	Efecto enriquecedor	Referencia
<i>Arthrospira platensis</i>	Extracto	Yogur queso	y Anticancerígeno; antioxidante antiinflamatorio	Sin diferencias y	Crecimiento del probiótico Lactobacillus casei queso tipo feta acidificado bacteriológicamente (BAF).	del (Agustini et al., 2016); en (Golmakani et al., 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Polvo o harina	Galletas bizcochos	y Actividad antioxidante	Color verde intenso	Aumento de contenido fenólico del 2 % al 6 %	(Batista et al., 2017)
<i>Tetraselmis chuii</i>	Camarón	lío­filizado	Actividad antioxidante y resistente al estrés salino inverso	NR	Alta resistencia a la prueba de estrés inverso (76,7–100%)	(Rahman et al., 2017)
<i>Arthrospira platensis</i>	Pan (crostini)	Pan (costini)	Mayor capacidad antioxidante, inmunomodulador y antiinflamatorio	Color verde	Aumento de proteínas en el pan crostini (p < 0,05), ficotina y contenido fenólico	(Niccolai et al., 2019)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Cápsulas	Suplementos	Rica en astaxantina, farmacéutica y alimentos	NR	Absorción de astaxantina (3,3-dihidroxi-β, β-caroteno-4,4-diona)	(Abdel-Hameed et al., 2023)
<i>Espirulina platensis</i>	Carne	Polvo spray	o Propiedades nutricionales aumentadas	Color y sabor intensos	Enriquece la composición de ácidos grasos y reduce la	(Furbeyre et al., 2016);

	(generalmente verdes)	ingesta saturadas	de	grasas (Guo et al., 2024)
Nota: No reportado (NR)				

CONCLUSIONES

Las algas de agua dulce representan un recurso poderoso y sostenible para el desarrollo de alimentos funcionales de alto valor en la industria alimentaria, su perfil nutricional compuesto con bioactivos, tiene un papel fundamental al fortificar alimentos, las cianobacterias como *Arthrospira*, *Aphanizomenon* y microalgas verdes *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus* aportan proteínas completas, polisacáridos bioactivos, lípidos y micronutrientes en concentraciones superiores a muchos cultivos terrestres, lo cual las posiciona como candidatas ideales para el desarrollo de alimentos funcionales y suplementos nutraceuticos.

La implementación de métodos de extracción impulsa el aprovechamiento industrial como ultrasonido, microondas, CO₂ supercrítico y extracción enzimática aumentan notablemente los rendimientos de compuestos bioactivos, mientras que las tecnologías ómicas (metabolómica, proteómica y lipidómica) permiten una caracterización detallada de las rutas metabólicas y la optimización de cepas para aplicaciones específicas en la industria alimentaria, y con ello se podría cuantificar los metabolitos asociados a las propiedades funcionales y estudios in vivo o in vitro ayudarían a verificar su impacto tanto en la nutrición y la salud del ser humano.

Para impulsar el uso industrial de microalgas en alimentos funcionales, es esencial caracterizar todas las especies, desarrollar sistemas de producción y aplicar tecnologías de procesamiento sostenibles e innovadoras que transformen la biomasa cruda en productos de alto valor sin comprometer su calidad nutricional ni el entorno. Métodos no térmicos emergentes como la fermentación, ultrasonificación, microondas, campos eléctricos pulsados y enzimas permiten conservar los compuestos funcionales y garantizar la seguridad alimentaria. Al consumirlas directamente o añadir a matrices alimentarias para potenciar su aceptación, alineadas con las necesidades del consumidor, que complementariamente puede evaluarse aspectos críticos como la bioaccesibilidad, biodisponibilidad y beneficios para la salud tan requeridos de verificación, esto permitirá un cubrir estas brechas de conocimiento que con una adecuada transferencia tecnológica puede impulsar y dinamizar el desarrollo industrial en este sector.

- Abdel-Hameed, M., Sestric, R., Hardy, B., Levin, D. B., y Sorensen, J. L. (2023). *Astaxanthin stability in intracellular and extracellular conditions from the green alga Haematococcus pluvialis*. *Food Chemistry Advances*, 3, 100432–100432. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100432>
- Abreu, A. P., Martins, R., y Nunes, J. (2023). *Emerging Applications of Chlorella sp. and Spirulina (Arthrospira) sp.* *Bioengineering*, 10(8), 955. <https://doi.org/10.3390/bioengineering1008>
- Agustini, W., Ma'ruf, F., Widayat, W., Suzery, M., Hadiyanto H., y Benjakul, S. (2016). *Application of spirulina platensis on ice cream and soft cheese with respect to their nutritional and sensory perspectives*. *Jurnal Teknologi*, 78(4-2). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8216>
- Amato, A., Terzo, S., Pierenrico Marchesa, Maffongelli, A., Martorana, M., Scoglio, S., y Mulè, F. (2021). *Spasmolytic Effects of Aphanizomenon Flos Aquae (AFA) Extract on the Human Colon Contractility*. *Nutrients*, 13(10), 3445–3445. <https://doi.org/10.3390/nu13103445>
- Ampofo, J., y Abbey, L. (2022). *Microalgae: Bioactive Composition, Health Benefits, Safety and Prospects as Potential High-Value Ingredients for the Functional Food Industry*. *Foods*, 11(12), 1744–1744. <https://doi.org/10.3390/foods11121744>
- Armardini, A., Imelda, I., Yerizel, E., Suharti, N., Kusnanda, A. J., y Musifa, E. (2024). *Characterization and Biological activities of Phycocyanin extracted from Spirulina platensis local isolate of Maninjau Lake, West Sumatra, Indonesia*. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 3119–3126. <https://doi.org/10.52711/0974-360x.2024.00488>
- Arora, N., Pienkos, P. T., Vikas Pruthi, Poluri, K. M., y Guarnieri, M. T. (2018). *Leveraging algal omics to reveal potential targets for augmenting TAG accumulation*. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1274–1292. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.04.005>
- Aswathy, V., Mavai, S., Bains, A., Sridhar, K., Inbaraj, B. S., Chawla, P., y Sharma, M. (2025). *Unveiling the potential of freshwater edible algae: Innovative extractions and functional food applications*. *South African Journal of Botany*, 177, 643–664. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.12.023>
- Ayub, A., Rahayu, F., Khamidah, A., Antarlina, S. S., Iswari, K., Supriyadi, K., Mufidah, E., Singh, A., Chopra, C., y Wani, A. K. (2025). *Harnessing microalgae as a bioresource for nutraceuticals: advancing bioactive compound exploration and shaping the future of health and functional food innovation*. *Discover Applied Sciences*, 7(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06916-3>
- Batista, A. P., Niccolai, A., Patrícia Fradinho, Fragoso, S., Bursic, I., Rodolfi, L., Biondi, N., Tredici, M. R., Sousa, I., y Raymundo, A. (2017). *Microalgae biomass as an alternative ingredient in cookies: Sensory, physical and chemical properties, antioxidant activity and in vitro digestibility*. *Algal Research*, 26, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.07.017>
- Baumgardt, F. J. L., Filho, A. Z., Brandalize, M. V., da, C., Antoniosi, N. R., Abreu, P. C. O. V., Corazza, M. L., y Ramos, L. P. (2015). *Lipid content and fatty acid profile of Nannochloropsis oculata before and after extraction with conventional solvents and/or compressed fluids*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 108, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.11.003>
- Begum, N., Qi, F., Yang, F., Khan, Q. U., None Faizan, Fu, Q., Li, J., Wang, X., Wang, X., Wang, J., Li, R., Liu, D., y Zhang, W. (2024). *Nutritional Composition and Functional Properties of A. Platensis-Derived Peptides: A Green and Sustainable Protein-Rich Supplement*. *Processes*, 12(11), 2608–2608. <https://doi.org/10.3390/pr12112608>

- Chiellini, C., Serra, V., Gammuto, L., Ciurli, A., Longo, V., y Gabriele, M. (2022). *Evaluation of Nutraceutical Properties of Eleven Microalgal Strains Isolated from Different Freshwater Aquatic Environments: Perspectives for Their Application as Nutraceuticals*. *Foods*, 11(5), 654. <https://doi.org/10.3390/foods11050654>
- Comer, J., Bassette, M., Burghart, R., Loyd, M., Ishiguro, S., Azhagiya Singam, E. R., Vergara-Jaque, A., Nakashima, A., Suzuki, K., Geisbrecht, B. V., y Tamura, M. (2021). *Beta-1,3 Oligoglucans Specifically Bind to Immune Receptor CD28 and May Enhance T Cell Activation*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6), 3124. <https://doi.org/10.3390/ijms22063124>
- Cotas, J., Leandro, A., Monteiro, P., Pacheco, D., Figueirinha, A., Gonçalves, A. M. M., da Silva, G. J., y Pereira, L. (2020). *Seaweed Phenolics: From Extraction to Applications*. *Marine Drugs*, 18(8), 384. <https://doi.org/10.3390/md18080384>
- Couto, D., Conde, T. A., Melo, T., Neves, B., Costa, M., Cunha, P., Guerra, I., Correia, N., Silva, J. T., Pereira, H., Varela, J., Silva, J., Domingues, R., y Domingues, P. (2022). *Effects of outdoor and indoor cultivation on the polar lipid composition and antioxidant activity of Nannochloropsis oceanica and Nannochloropsis limnetica: A lipidomics perspective*. *Algal Research*, 64, 102718–102718. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102718>
- Díaz-Godínez, G., Peña-Solis, K., y Díaz-Domínguez, G. (2024). *Algae as nutritional and bioactive food ingredients*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 23(2), 1–22. <https://doi.org/10.24275/rmiq/bio24209>
- Furbeyre, J. van Milgen, T. Mener, M. Gloaguen, y E. Labussière. (2016). *Effects of dietary supplementation with freshwater microalgae on growth performance, nutrient digestibility and gut health in weaned piglets*. *Animal*, 11(2), 183–192. <https://doi.org/10.1017/s1751731116001543>
- Galizzi, G., Deidda, I., Amato, A., Calvi, P., Terzo, S., Caruana, L., Scoglio, S., Mulè, F., y Di Carlo, M. (2023). *Aphanizomenon flos-aquae (AFA) Extract Prevents Neurodegeneration in the HFD Mouse Model by Modulating Astrocytes and Microglia Activation*. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(5), 4731. <https://doi.org/10.3390/ijms24054731>
- Gallego, R., Bueno, M., Chourio, A. M., Ibáñez, E., Marleny D.A. Saldaña, y Herrero, M. (2020). *Use of high and ultra-high pressure based-processes for the effective recovery of bioactive compounds from Nannochloropsis oceanica microalgae*. *The Journal of Supercritical Fluids*, 167, 105039–105039. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.105039>
- Garnier, M., Carrier, G., H. Rogniaux, Nicolau, E., G. Bougaran, B. Saint-Jean, y Cadoret, J. P. (2014). *Comparative proteomics reveals proteins impacted by nitrogen deprivation in wild-type and high lipid-accumulating mutant strains of Tisochrysis lutea*. *Journal of Proteomics*, 105, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2014.02.022>
- Golmakani, M.-T., Soleimanian-Zad, S., Alavi, N., Nazari, E., y Eskandari, M. H. (2018). *Effect of Spirulina (Arthrospira platensis) powder on probiotic bacteriologically acidified feta-type cheese*. *Journal of Applied Phycology*, 31(2), 1085–1094. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1611-2>
- Gowda, G. A. N., y Djukovic, D. (2014). *Overview of Mass Spectrometry-Based Metabolomics: Opportunities and Challenges*. *Methods in Molecular Biology*, 3–12. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1258-2_1

Algas de agua dulce

- Gu, Y., Yee, M., Lian, L., Shimizu, K., Chae, K.-J., Ngoc, T., y Khoo, K. S. (2024). *Genetic engineering of Haematococcus pluvialis microalgae for the enhancement of astaxanthin production: A review*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 60, 103298–103298. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103298>
- Guarnieri, M. T., y Pienkos, P. T. (2014). *Algal omics: unlocking bioproduct diversity in algae cell factories*. Photosynthesis Research, 123(3), 255–263. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-9989-4>
- Guo, J., Huang, Y., Gu, X., y Meng, Z. (2024). *Spirulina platensis protein-based emulsion gel as fat substitute in meat analogs: Evaluation performance across post-processing*. Food Chemistry, 463, 141414–141414. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141414>
- Hughes, A. H., Magot, F., Tawfike, A. F., Rad-Menéndez, C., Thomas, N., Young, L. C., Stucchi, L., Caretoni, D., Stanley, M. S., Edrada-Ebel, R., y Duncan, K. R. (2021). *Exploring the Chemical Space of Macro- and Micro-Algae Using Comparative Metabolomics*. Microorganisms, 9(2), 311. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020311>
- Ilyas, Z., Ali Redha, A., Wu, Y. S., Ozeer, F. Z., y Aluko, R. E. (2023). *Nutritional and Health Benefits of the Brown Seaweed Himanthalia elongata*. Plant Foods for Human Nutrition, 78(2), 233–242. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01056-8>
- Ioulia Georgiopoulou, Soultana Tzima, Louli, V., y Magoulas, K. (2023). *Process Optimization of Microwave-Assisted Extraction of Chlorophyll, Carotenoid and Phenolic Compounds from Chlorella vulgaris and Comparison with Conventional and Supercritical Fluid Extraction*. Applied Sciences, 13(4), 2740–2740. <https://doi.org/10.3390/app13042740>
- Irvani, N., King, J., Hamzelou, S., Ji, D., Tahmasian, A., Kebede, B., Carne, A., Agyei, D., y Oey, I. (2024). *Impact of different food-grade protein extraction methods on the proteomic profile and potential allergenicity of Spirulina (Arthrospira platensis)*. Algal Research, 103765–103765. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103765>
- Ivanova, P. T., Milne, S. B., Myers, D. S., y Brown, H. A. (2009). *Lipidomics: a mass spectrometry-based systems level analysis of cellular lipids*. Current Opinion in Chemical Biology, 13(5-6), 526–531. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2009.08.011>
- Jadhav, H. B., Choudhary, P., Deshmukh, N. D., Singh, D. K., Das, M., Das, A., Sai, S., Muthusamy, G., Annapure, U. S., Ramniwas, S., Mugabi, R., y Gulzar Ahmad Nayik. (2024). *Advancements in non-thermal technologies for enhanced extraction of functional triacylglycerols from microalgal biomass: A comprehensive review*. Food Chemistry X, 23, 101694–101694. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101694>
- Joana, Madalena Grácio, Sousa, I., António Pagarete, Nunes, M. C., y Raymundo, A. (2023). *Tuning the Bioactive Properties of Dunaliella salina Water Extracts by Ultrasound-Assisted Extraction*. Marine Drugs, 21(9), 472–472. <https://doi.org/10.3390/md21090472>
- Kamil, S. N., Tezcanlı, S., Çelik, Y., Toprakçı, İ., y Şahin, S. (2025). *Optimized extraction of Spirulina platensis phenolics using natural deep eutectic solvents for cosmetics*. Preparative Biochemistry y Biotechnology, 1–14. <https://doi.org/10.1080/10826068.2025.2467440>
- Karthigee, T., Goon, J. A., Suzana Makpol, y Tan, J. K. (2023). *Effects of Microalgae on Metabolic Syndrome*. Antioxidants, 12(2), 449–449. <https://doi.org/10.3390/antiox12020449>
- Kim, M. S., Kim, J. Y., Choi, W. H., y Lee, S. S. (2008). *Effects of seaweed supplementation on blood glucose concentration, lipid profile, and antioxidant enzyme activities in patients with type 2*

- diabetes mellitus*. Nutrition Research and Practice, 2(2), 62–62. <https://doi.org/10.4162/nrp.2008.2.2.62>
- Lauritano, C., Ferrante, M. I., y Rogato, A. (2019). *Marine Natural Products from Microalgae: An -Omics Overview*. Marine Drugs, 17(5), 269. <https://doi.org/10.3390/md17050269>
- Lawton, R. J., Nys, R. de, y Paul, N. A. (2013). *Selecting Reliable and Robust Freshwater Macroalgae for Biomass Applications*. PLoS ONE, 8(5), e64168–e64168. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064168>
- Liu, W., Wang, J., Gao, Q., Shen, W., Weng, P., Wu, Z., Qin, W., y Liu, Y. (2024). *Combined analysis of gut microbiota and metabolomics in high-fat model mice fed with Chlorella pyrenoidosa peptides*. Journal of Functional Foods, 121, 106410–106410. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106410>
- Lucas, B. F., y Brunner, T. A. (2024). *Attitudes and perceptions towards microalgae as an alternative food: A consumer segmentation in Switzerland*. Algal Research, 78, 103386. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103386>
- Martínez-Sámano, J., Torres-Montes de Oca, A., Luqueño-Bocardo, O. I., Torres-Durán, P. V., y Juárez-Oropeza, M. A. (2018). *Spirulina maxima Decreases Endothelial Damage and Oxidative Stress Indicators in Patients with Systemic Arterial Hypertension: Results from Exploratory Controlled Clinical Trial*. Marine Drugs, 16(12), 496. <https://doi.org/10.3390/md16120496>
- Méndez-Ancca, Renzo Pepe-Victoriano, Hebert, Zambrano-Cabanillas, A. W., Olegario Marín-Machuca, Zapata, C., Maquera, M. M., Rosmery Fernandez Huanca, Aguilera, J. G., Zuffo, A. M., y Ratke, R. F. (2023). *Physicochemical Evaluation of Cushuro (Nostoc sphaericum Vaucher ex Bornet y Flahault) in the Region of Moquegua for Food Purposes*. Foods, 12(10), 1939–1939. <https://doi.org/10.3390/foods12101939>
- Michalak, I., y Messyas, B. (2020). *Concise review of Cladophora spp.: macroalgae of commercial interest*. Journal of Applied Phycology, 33(1), 133–166. <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02211-3>
- Mubarak, M., A. Shaija, y T.V. Suchithra. (2014). *A review on the extraction of lipid from microalgae for biodiesel production*. Algal Research, 7, 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.10.008>
- Naik, B., Mishra, R., Kumar, V., Mishra, S., Gupta, U., Rustagi, S., Gupta, A. K., Preet, M. S., Bhatt, S. C., y Rizwanuddin, S. (2024). *Micro-algae: Revolutionizing food production for a healthy and sustainable future*. Journal of Agriculture and Food Research, 15, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100939>
- Nguyen, H. C., Ngo, K. N., Tran, H. K., y Barrow, C. J. (2024). *Enzyme-Assisted Coextraction of Phenolics and Polysaccharides from Padina gymnospora*. Marine Drugs, 22(1), 42–42. <https://doi.org/10.3390/md22010042>
- Niccolai, A., Venturi, M., Galli, V., Pini, N., Rodolfi, L., Biondi, N., D'Ottavio, M., Batista, A. P., Raymundo, A., Granchi, L., y Tredici, M. R. (2019). *Development of new microalgae-based sourdough “crostini”: functional effects of Arthrospira platensis (spirulina) addition*. Scientific Reports, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55840-1>

Algas de agua dulce

- Nikolova, K., Petkova, N., Mihaylova, D., Gentscheva, G., Gavrilov, G., Pehlivanov, I., y Andonova, V. (2024). *Extraction of Phycocyanin and Chlorophyll from Spirulina by "Green Methods."* Separations, 11(2), 57. <https://doi.org/10.3390/separations11020057>
- Noura El-Ahmady El-Naggar, Hussein, M. H., Shaaban-Dessuuki, S. A., y Dalal, S. R. (2020). *Production, extraction and characterization of Chlorella vulgaris soluble polysaccharides and their applications in AgNPs biosynthesis and biostimulation of plant growth.* Scientific Reports, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59945-w>
- Nur, S., Tan, J. S., Siti Nurbaya Oslan, Matanjun, P., Mohd, A., Rossita Shapawi, y Huda, N. (2021). *Haematococcus pluvialis as a Potential Source of Astaxanthin with Diverse Applications in Industrial Sectors: Current Research and Future Directions.* Molecules, 26(21), 6470–6470. <https://doi.org/10.3390/molecules26216470>
- Podgórska-Kryszczuk, I. (2024). *Spirulina—An Invaluable Source of Macro- and Micronutrients with Broad Biological Activity and Application Potential.* Molecules, 29(22), 5387–5387. <https://doi.org/10.3390/molecules29225387>
- Ponce, E. (2014). *Nostoc: un alimento diferente y su presencia en la precordillera de Arica.* Idesia, 32(2), 119–121. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292014000200015>
- Prihanto, A., Jatmiko, D., Wakayama, M. (2022). *Microalgas de agua dulce como fuentes prometedoras de alimentos: propiedades nutricionales y funcionales.* <https://openmicrobiologyjournal.com/volume/16/locator/e187428582206200/fulltext/>
- Rahman, N. A., Khatoon, H., Yusuf, N., Banerjee, S., Haris, N. A., Lananan, F., y Tomoyo, K. (2017). *Tetraselmis chuii biomass as a potential feed additive to improve survival and oxidative stress status of Pacific white-leg shrimp Litopenaeus vannamei postlarvae.* International Aquatic Research, 9(3), 235–247. <https://doi.org/10.1007/s40071-017-0173-2>
- Rivera, E., José, B., y Requena, Z. (2020). *Las microalgas como fuente de nutrientes en vías de desarrollo.* Trabajo de fin de grado. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/107312/1/Las_microalgas_como_fuente_de_nutrientes_en_vias_de_d_Agudelo_Rivera_Esteban.pdf
- Romay, C., Remírez, D., y González, R. (2025). *Actividad antioxidante de la ficocianina frente a radicales peroxílicos y la peroxidación lipídica microsomal.* Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas, 20(1), 38–41. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03002001000100008
- Santana, A., Jesus, S., Larrayoz, M. A., y Filho, R. M. (2012). *Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Algal Lipids for the Biodiesel Production.* Procedia Engineering, 42, 1755–1761. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.569>
- Scoglio, G. D., Jackson, H. O., y Purton, S. (2024). *The commercial potential of Aphanizomenon flos-aquae, a nitrogen-fixing edible cyanobacterium.* Journal of Applied Phycology, 36(4), 1593–1617. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03214-0>
- Sharma, P., Slathia, P. S., Raina, N., y Bhagat, D. (2019). *Microbial diversity in freshwater ecosystems and its industrial potential.* Freshwater Microbiology, 341–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817495-1.00009-8>
- Shen, L., Pang, S., Zhong, M., Sun, Y., Qayum, A., Liu, Y., Rashid, A., Xu, B., Liang, Q., Ma, H., y Ren, X. (2023). *A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies.* Ultrasonics Sonochemistry, 101, 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>

- Sirohi, R., Joun, J., Choi, H. I., Gaur, V. K., y Sim, S. J. (2021). *Algal glycobiotechnology: omics approaches for strain improvement*. Microbial Cell Factories, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01656-6>
- Su, X., Xu, J., Yan, X., Zhao, P., Chen, J., Zhou, C., Zhao, F., y Li, S. (2012). *Lipidomic changes during different growth stages of Nitzschia closterium f. minutissima*. Metabolomics, 9(2), 300–310. <https://doi.org/10.1007/s11306-012-0445-1>
- Sun, J., Li, Q., Xu, H., y Zhang, W. (2022). *Analysis of Metabolomic Changes in Xylem and Phloem Sap of Cucumber under Phosphorus Stresses*. Metabolites, 12(4), 361. <https://doi.org/10.3390/metabo12040361>
- Tavakoli, S., Hong, H., Wang, K., Yang, Q., Hadi Hashemi Gahruie, Zhuang, S., Li, Y., Liang, Y., Y., y Luo, Y. (2021). Ultrasonic-assisted food-grade solvent extraction of high-value added compounds from microalgae *Spirulina platensis* and evaluation of their antioxidant and antibacterial properties. Algal Research, 60, 102493–102493. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102493>
- Tipnee, S., Ramaraj, R., y Unpaprom, Y. (2015). *Nutritional Evaluation of Edible Freshwater Green Macroalga Spirogyra varians*. Emer Life Sci Res, 1(2), 1–7. https://www.emergentresearch.org/uploads/38/1778_pdf.pdf
- Valado, A., y Pereira, L. (2023). *Algae and cardiovascular-health*. Elsevier EBooks, 493–517. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-98819-3.00009-2>
- Wang, Y., Tibbetts, S., y McGinn, P. (2021). *Microalgae as Sources of High-Quality Protein for Human Food and Protein Supplements*. Foods, 10(12), 3002–3002. <https://doi.org/10.3390/foods10123002>
- Webb, P., Somers, N. K., y Thilsted, S. H. (2023). *Seaweed's contribution to food security in low- and middle-income countries: Benefits from production, processing and trade*. Global Food Security, 37, 100686–100686. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100686>
- Wetterwald, L., Leybros, A., Fleury, G., Delrue, F., Dimitriadis-Lemaire, A., Chambonniere, P., y Hertz, A. (2023). *Supercritical CO2 extraction of neutral lipids from dry and wet Chlorella vulgaris NIES 227 microalgae for biodiesel production*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(5), 110628. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110628>
- Wu, J. Y., Tso, R., Teo, H. S., y Haldar, S. (2023). *The utility of algae as sources of high value nutritional ingredients, particularly for alternative/complementary proteins to improve human health*. Frontiers in Nutrition, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1277343>
- Zhang, K., Wan, M., Bai, W., He, M., Wang, W., Fan, F., Guo, J., Yu, T., y Li, Y. (2023). *A novel method for extraction of paramylon from Euglena gracilis for industrial production*. Algal Research, 71, 103058. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103058>
- Zhou, J., Wang, M., Saraiva, J. A., Martins, A. P., Pinto, C. A., Prieto, M. A., Simal-Gandara, J., Cao, H., Xiao, J., y Barba, F. J. (2022). *Extraction of lipids from microalgae using classical and innovative approaches*. Food Chemistry, 384, 132236–132236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132236>
- Ziyaei, K., Abdi, F., Mokhtari, M., Daneshmehr, M. A., y Ataie, Z. (2023). *Phycocyanin as a nature-inspired antidiabetic agent: A systematic review*. Phytomedicine, 119, 154964. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2023.154964>