

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 04 de agosto de 2025

Aceptado 18 de marzo de 2026

Publicado 09 de mayo de 2026

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2026.3573>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: thalasia@seallg.com

- 1 Seallg. Solutions, Innovation, and Products Startup. Bioeconomy Living Lab and Science and Technology-Based Startup Incubators in the Ribeira Valley (Aquário de Ideias), 11900-000 Registro, São Paulo, Brasil.
- 2 Research Center for Biodiversity Dynamics and Climate Change, São Paulo State University, Registro Campus, 11900-000 Registro, São Paulo, Brasil.
- 3 Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, National Institute of Science and Technology in Nanotechnology for Sustainable Agriculture, São Paulo State University, 18087-180 Sorocaba, São Paulo, Brasil.
- 4 Department of Fisheries Resources and Aquaculture, School of Agricultural Sciences, Institute of Advanced Marine Studies, São Paulo State University, 11900-000 Registro, São Paulo, Brasil.
- 5 ALGHA Marine Biotec PTY LTD, 4031 Brisbane, Queensland, Australia.
- 6 Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney, 2007 Sydney, New South Wales, Australia.
- 7 Engineering of Biomaterials and Bioprocess Postgraduate Program, Institute of Pharmacy, São Paulo State University, 14800-700 Araraquara, São Paulo, Brasil.
- 8 Aquaculture Center, São Paulo State University, 14884-900 Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2026.3573>

Desbloqueando el potencial de las macroalgas cultivadas *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp. para alimentos sostenibles del futuro: valor nutricional, perfil de ácidos grasos y seguridad microbiológica

Johana M Concha-Obando^{1,2,3}, Thalasia Cunha-dos Santos^{1,4*}, Luís J Erazo-Gallo^{5,6}, Jenny P Concha-Obando⁵, Luiz Felipe Estef-Silvares⁵, Maria V Raupp-Sebastião⁴, Levi Pompermayer-Machado^{2,3,7}, Guilherme Wolff-Bueno^{2,3,4,8}

RESUMEN. Las macroalgas marinas son reconocidas cada vez más como recursos valiosos para el desarrollo de alimentos funcionales sostenibles debido a su diversa composición bioquímica. Su cultivo se ha convertido en un sector importante de la acuicultura mundial, cuyo objetivo es proporcionar fuentes sostenibles de biomasa y ampliar sus potenciales aplicaciones. Sin embargo, la biomasa obtenida de muchos cultivos emergentes requiere una evaluación previa de su perfil nutricional. Este estudio evaluó la composición nutricional de *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp. cultivadas en sistemas de cultivo australianos y su potencial uso en futuras aplicaciones alimentarias. Para garantizar la trazabilidad y consistencia de las materias primas, se realizaron análisis del contenido total de carbohidratos y proteínas, ácidos grasos saturados y monoinsaturados, perfiles de omega-3 (e.g., ácido eicosapentaenoico) y omega-6, contenido de α - y β -caroteno y perfiles completos de aminoácidos. También se realizaron evaluaciones microbiológicas (recuento estándar en placa para anaerobios, coliformes, *Salmonella*, esporas mesófilas, levaduras y hongos) y análisis de metales pesados (Sb, As, Cd, Cu, Pb, Hg, Se, Sn y Zn). Entre los resultados más destacados, *E. radiata* y *Cladophora* sp. presentaron bajo contenido total de grasa (1.56% y 1.8%, respectivamente). *Ecklonia radiata* destacó por su alto contenido de carbohidratos (62.48%) y aminoácidos esenciales, como lisina (718.52 mg·100 g⁻¹), además de elevados niveles de omega-3 (especialmente ácido eicosapentaenoico [9.3%]) y una calidad microbiológica aceptable. Por otro lado, *Cladophora* sp. se caracterizó por su alto contenido de cenizas (60.9%), β -caroteno (180 μ g·100 g⁻¹) y arginina (750 mg·100 g⁻¹). Sin embargo, su menor calidad microbiológica y elevados niveles de metales pesados sugieren la necesidad de precaución en su utilización como componente en alimentos funcionales. Las diferencias nutricionales entre ambas especies sugieren un potencial complementario, abriendo importantes oportunidades para el desarrollo de futuras aplicaciones de alimentos funcionales basados en macroalgas.

Palabras clave: algas, suplementos dietéticos, bioproductos alimentarios, nutrientes promotores de la salud, perfil nutricional.



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

INTRODUCCIÓN

Las especies de macroalgas están ampliamente distribuidas en las regiones costeras de todo el mundo, desde zonas tropicales hasta templadas y polares (Sarkar et al. 2016). Estas especies son consideradas las macroalgas del milenio debido a sus beneficios sociales, económicos y ambientales (Sultana et al. 2023). Las macroalgas han despertado un creciente interés comercial debido a su amplia gama de aplicaciones, incluyendo su uso como fuente de hidrocoloides (e.g., agar, alginato y carragenina), así como en colorantes, alimentos, enzimas, medicamentos, piensos, fertilizantes, cosméticos, textiles y diversos productos biotecnológicos. Gran parte de su utilidad se debe a su sofisticada maquinaria metabólica, capaz de sintetizar una amplia gama de metabolitos primarios y secundarios funciones biológicas relevantes (Jeeva et al. 2012).

El cultivo de algas marinas se ha vuelto cada vez más común entre las comunidades costeras, constituyendo una importante fuente de ingresos de subsistencia (Agyarko 2017). La producción mundial de acuicultura alcanzó un récord histórico en 2022, totalizando 36.5 millones de t (peso húmedo) de algas (incluyendo macroalgas y microalgas), valoradas en US\$ 17 mil millones, con una tasa media de crecimiento anual de 5.8% (FAO 2024). Aunque la producción mundial de algas se ha más que triplicado en los últimos 20 años, todavía está dominada (86%) por países asiáticos, en particular China (58%) (FAO 2024). Para satisfacer la futura demanda de alimentos, la acuicultura de macroalgas debe expandirse más allá de Asia hacia regiones con alto potencial. Esta expansión creará oportunidades para diversificar el sector mediante el cultivo de especies nativas y endémicas con un fuerte potencial comercial (Biancacci et al. 2022). De hecho, las especies que ocupan niveles tróficos inferiores, como las algas, constituyen el 17% de la producción acuícola total y ofrecen importantes oportunidades para mejorar notablemente la sostenibilidad del suministro de alimentos acuáticos mundial (FAO 2024, Vijayaram et al. 2024).

El cultivo de macroalgas ha sido reconocido cada vez más como una práctica sostenible debido a su papel como sumidero de carbono, mediante la absorción de CO₂ del agua de mar y su contribución a la mitigación de la acidificación oceánica y a la protección de los ecosistemas marinos (Duarte et al. 2017, Kim y Kim 2024, Maulana y Rosariawari 2024), además de apoyar los esfuerzos de mitigación del cambio climático a gran escala (Yong et al. 2022). La acuicultura de macroalgas tiene un gran potencial para remover N y P de los ecosistemas costeros, contribuyendo a la reducción de la eutrofización mediante la eliminación del exceso de nutrientes de los cuerpos de agua y la mejora de la calidad del agua. No obstante, su papel en la bioextracción de nutrientes ha sido poco reconocido o explorado (Racine et al. 2021). Además, el cultivo de macroalgas puede ayudar a proteger las zonas costeras al amortiguar la energía del oleaje y reducir los daños físicos causados por las tormentas (Behera et al. 2022). Por

otra parte, los cultivos en mar abierto de macroalgas tienen el potencial de complementar la agricultura terrestre y desempeñar un papel importante en el fortalecimiento del suministro mundial de alimentos. Los modelos actuales estiman que el uso de solo el 1% del espacio oceánico adecuado para el cultivo de macroalgas podría proporcionar entre el 2% y el 14% del suministro mundial de alimentos (Van Oort et al. 2023).

Aunque la acuicultura mundial de macroalgas ha crecido exponencialmente durante las últimas 4 décadas, Australia aún enfrenta dificultades para superar su dependencia de la recolección silvestre con el fin de satisfacer las demandas industriales (Steven et al. 2020). No obstante, el país presenta condiciones ambientales y regulatorias favorables (e.g., alta calidad del agua y una extensa línea costera), así como un amplio potencial de mercado en sectores como alimentos, piensos, fertilizantes, nutracéuticos, productos farmacéuticos y nuevos polímeros. En particular, Australia Meridional ha sido identificada como una de las regiones más prometedoras del mundo para el desarrollo sostenible de esta industria. Informes recientes estiman que este sector podría alcanzar un valor bruto de producción de US\$75 millones y generar 1,200 empleos directos para 2025, con proyecciones superiores a US\$1,000 millones en valor bruto de producción y 9,000 empleos para 2040, especialmente en costas templadas y áreas en mar abierto (Theuerkauf et al. 2019, Visch et al. 2023).

Estudios recientes sobre ingredientes funcionales derivados de macroalgas han destacado a las algas pardas como una fuente abundante de nutracéuticos y diversos compuestos bioactivos (Alloyarova et al. 2024). Entre los compuestos más destacados se encuentran los polisacáridos sulfatados (e.g., fucoidano), compuestos fenólicos (e.g., florotaninos) y carotenoides (e.g., fucoxantina). Además, las algas pardas aportan ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), incluidos los ácidos grasos omega-3, así como péptidos bioactivos (Holdt y Kraan 2011). Estos compuestos bioactivos han sido asociados a un amplio espectro de actividades biológicas, incluyendo efectos antioxidantes, anti-VIH, antifúngicos, anticancerígenos, antidiabéticos, antimicrobianos, anticoagulantes, antivirales, antitumorales, antiinflamatorios, inmunomoduladores, gastroprotectores y reductores del colesterol y los lípidos (Charoensiddhi et al. 2015, Thuy et al. 2015, Admassu et al. 2018, Dos Santos et al. 2024a, b).

El kelp dorado (*Ecklonia radiata*) se distribuye ampliamente en el hemisferio sur, ocurriendo principalmente en arrecifes rocosos submareales entre los 27°S y 48°S, y es considerado la macroalga más abundante en las aguas australianas, contribuyendo sustancialmente a la productividad de biomasa costera (Steinberg y Kendrick 1999, Wernberg et al. 2019). A pesar de su dominancia ecológica, esta especie continúa siendo poco explorada para aplicaciones de mayor valor agregado, y la mayor parte de su biomasa sigue destinada a usos de bajo valor, como fertilizantes y alimentación animal (Charoensiddhi et al. 2015). Diversos estudios han reportado

la presencia de biomoléculas de interés en *E. radiata*, incluyendo alginato, fucoidano y florotaninos (Lorbeer et al. 2017, Shrestha et al. 2021, Abdel-Latif et al. 2022), mientras que los avances recientes en técnicas de cultivo controlado han estimulado el interés por su acuicultura sostenible (Praeger et al. 2022).

En paralelo, las especies del género *Cladophora*, que comprenden más de 183 especies macroscópicas de algas verdes, presentan importancia ecológica y económica, además de una elevada tolerancia a condiciones ambientales variables (Hayakawa et al. 2012, Nutautaitė et al. 2021). Estas algas se caracterizan por su alto contenido de carbohidratos, minerales y proteínas, y han sido investigadas para aplicaciones en alimentos, alimentación animal, fertilizantes y producción de energía, posicionando a las especies de *Cladophora* como candidatas prometedoras para la acuicultura y el uso nutricional (Srimaroeng et al. 2015, Lawton et al. 2017, Munir et al. 2019, Michalak y Messyas 2021).

Considerando el ciclo completo de procesamiento de las macroalgas, desde el cultivo hasta el producto final, resulta evidente que el actual incremento de la producción mundial de macroalgas sigue siendo insuficiente para satisfacer la creciente demanda de biomasa (Pai et al. 2025). Esta demanda está impulsada por la amplia gama de aplicaciones convencionales y emergentes en este sector en rápida expansión (Duarte et al. 2017). Sin embargo, más allá del volumen de producción, uno de los principales desafíos radica en la disponibilidad de datos sobre la composición nutricional y la inocuidad de la biomasa de macroalgas cultivadas para uso alimentario (Ali et al. 2025). En este contexto es fundamental evaluar de manera rigurosa la calidad y las características específicas de esta biomasa, incluyendo su perfil nutricional y su seguridad microbiológica y química.

En el presente estudio, seleccionamos 2 especies de macroalgas ampliamente reconocidas por su abundancia y actualmente cultivadas en Australia. Nuestro objetivo fue caracterizar sus perfiles nutricionales (i.e., grasa total, grasas saturadas, cenizas, carbohidratos, valor energético, proteínas, α -caroteno y β -caroteno), determinados perfiles metabólicos (i.e., ácidos grasos y aminoácidos), así como su seguridad microbiológica y contenido de metales pesados. Este trabajo contribuye al entendimiento y valorización de *E. radiata* y *Cladophora* sp. cultivadas, y destaca su potencial nutricional y funcional. Los resultados aportan información preliminar valiosa sobre la composición y seguridad de *E. radiata* y *Cladophora* sp., además de respaldar su potencial aplicación en productos alimentarios y el desarrollo de bioproductos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de algas marinas

La biomasa seca de *E. radiata* fue obtenida de Auskelp Pty Ltd (Wonboyn, Australia) como parte del Proyecto Eden 1, que comprende un área de 200 ha destinada al cultivo de esta

especie. Este proyecto representa la primera granja comercial de macroalgas a escala comercial en las aguas costeras de Nueva Gales del Sur. El área propuesta para el cultivo se localiza a 23 km al suroeste de Eden, en Disaster Bay, y limita al norte con el faro de Green Cape.

La biomasa de *Cladophora* sp. fue obtenida del grupo Tassal (Hobart, Tasmania, Australia), el mayor productor integrado verticalmente de productos del mar en Australia, y recolectada en la granja Proserpine (norte de Queensland, Australia) el 7 de octubre de 2024. Posteriormente, la biomasa fue deshidratada y sellada al vacío. En la granja Proserpine, las macroalgas fueron cultivadas en 7 de los 12 tanques de sedimentación, mejorando naturalmente la calidad del agua mientras se producía el cultivo comercial secundario.

La biomasa de *Cladophora* sp. fue deshidratada para reducir el contenido de humedad y mejorar su estabilidad, sellada al vacío para su almacenamiento y posteriormente rehidratada hasta alcanzar un nivel estandarizado de humedad antes de los análisis. Las muestras fueron nuevamente selladas al vacío con el fin de preservar su integridad y garantizar la reproducibilidad analítica. Para permitir comparaciones directas entre las especies, los valores de *E. radiata* fueron convertidos de peso fresco a peso seco (PS) utilizando un factor de conversión. El contenido de humedad de las muestras de *E. radiata*, que se determinó mediante secado en estufa a 60 °C hasta alcanzar peso constante, fue 87.2%, indicando que la biomasa estaba compuesta predominantemente por agua. Este contenido de humedad fue utilizado para calcular el factor de conversión de peso fresco a peso seco (7.81), aplicado posteriormente en los análisis subsiguientes. La Figura 1 resume el origen de las muestras, los sitios de cultivo y el flujo analítico adoptado para la evaluación composicional y de seguridad de la biomasa de *E. radiata* y *Cladophora* sp.

Análisis bioquímicos y nutracéuticos

Los análisis bioquímicos y nutracéuticos de la biomasa de macroalgas fueron realizados por el *National Measurement Institute* (NMI; Port Melbourne, Australia). Los métodos utilizados fueron certificados por la *National Association of Testing Authorities* (NATA), Australia, y realizados bajo estándares de acreditación (ISO/IEC 17025). Las muestras fueron recibidas por el NMI en septiembre de 2024, asignadas a un código único de identificación y preparadas de acuerdo con protocolos internos específicos del NMI para cada procedimiento analítico.

Análisis de composición proximal

El contenido de humedad se determinó mediante el método gravimétrico (método interno del NMI VL298), el cual cuantifica la pérdida de agua tras el secado. El contenido de proteínas se determinó mediante el método Kjeldahl para nitrógeno (6.25 \times) (método interno del NMI VL299). El contenido de cenizas se determinó mediante el método

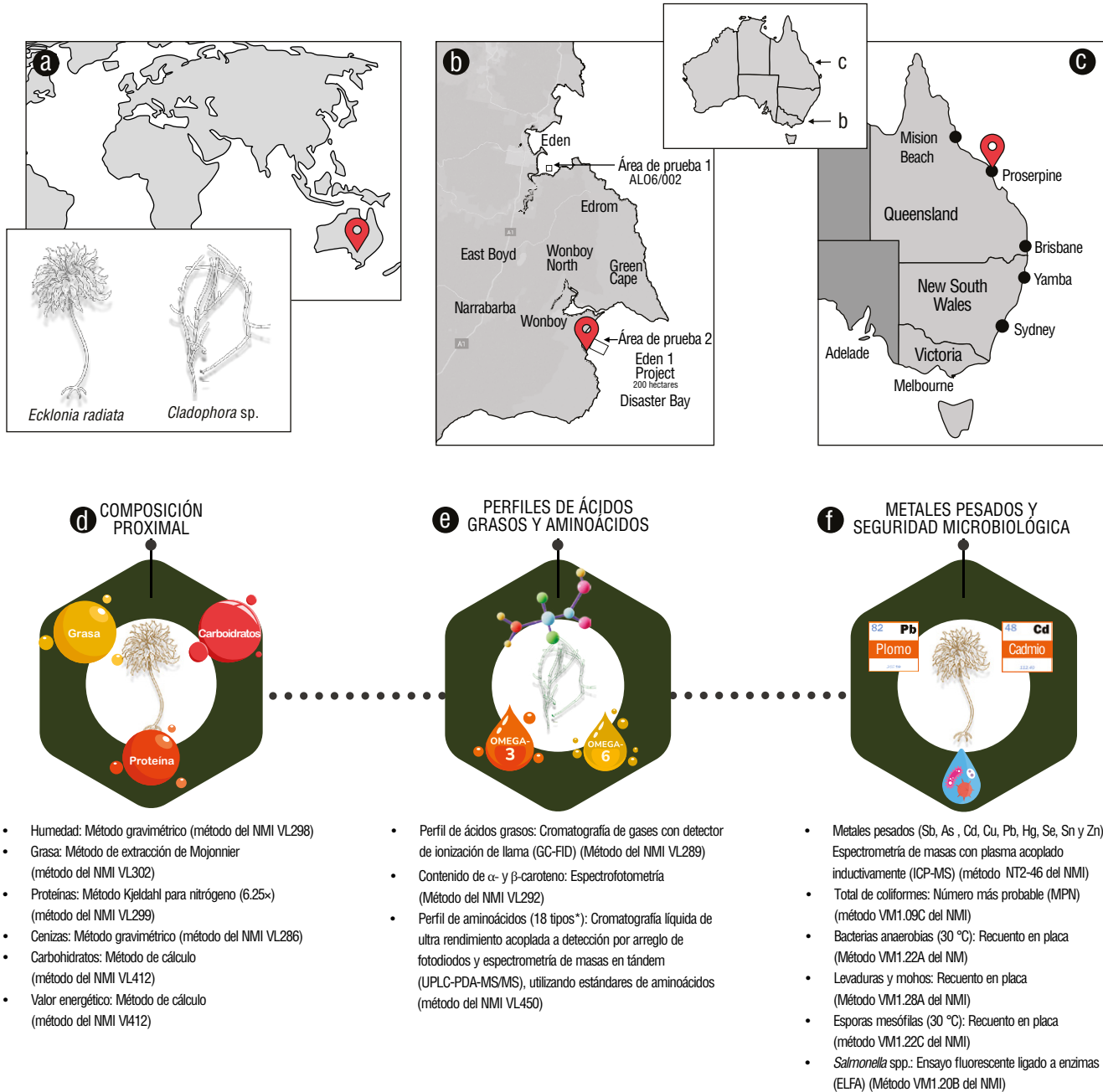


Figura 1. Procedencia de las muestras, procedimientos analíticos y evaluaciones composicionales de *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp. Ubicación de la granja de cultivo y del sitio de recolección de muestras en Australia, en el marco del *Green Light Accelerator Program* (a). Muestras de *Ecklonia radiata* obtenidas del *Eden Project 1* (área de prueba 1 o 2), operado por Auskelp Pty Ltd (Wonboyn, Australia) (b). *Cladophora* sp. fue recolectada en Proserpine Farm (Queensland, Australia), operada por Tassal Group (Hobart, Tasmania, Australia), el 7 de octubre de 2024 (c). Los análisis de composición proximal fueron realizados de acuerdo con métodos estandarizados del *National Measurement Institute* (NMI; Port Melbourne, Australia), incluyendo humedad (%), grasa (%), proteínas (%), cenizas (%), carbohidratos (% por diferencia) y energía ($\text{kJ}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ o $\text{kcal}\cdot 100\text{ g}^{-1}$) (d). Los perfiles de ácidos grasos (% del total de ácidos grasos), aminoácidos ($\text{mg}\cdot 100\text{ g}$ de peso seco $[\text{PS}]^{-1}$) y el contenido de carotenoides ($\mu\text{g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$) fueron obtenidos mediante métodos estandarizados del NMI (e). Los metales pesados (Sb, As, Cd, Cu, Pb, Hg, Se, Sn y Zn) ($\text{mg}\cdot \text{kg}^{-1}$ PS) fueron cuantificados utilizando métodos estandarizados del NMI. El análisis de seguridad microbiológica evaluó coliformes totales, bacterias anaerobias, levaduras, hongos, esporas mesófilas y *Salmonella* spp. (f). Todos los análisis fueron realizados siguiendo estándares certificados del laboratorio NMI, garantizando trazabilidad y cumplimiento de los requisitos de las autoridades nacionales de ensayo.

gravimétrico (método interno del NMI VL286), mientras que el contenido de carbohidratos y el valor energético se calcularon utilizando los factores de Atwater (método interno del NMI VL412). El contenido de grasa se determinó mediante el método de extracción de Mojonnier (límite de detección $<0.2 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) (método interno del NMI VL302).

Perfil de ácidos grasos y aminoácidos

El perfil de ácidos grasos se determinó mediante cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID) (método interno del NMI VL289). Las muestras de macroalgas fueron extraídas utilizando una mezcla de metanol-cloroformo, seguida de metilación con metóxido de sodio. Los ésteres metílicos de ácidos grasos fueron analizados mediante GC-FID (7890A GC; Agilent, Santa Clara, EE. UU.), y los ácidos grasos fueron identificados comparando sus tiempos de retención con los de estándares de referencia certificados (Stone et al. 2022). Además, el contenido de α - y β -caroteno se determinó mediante espectrofotometría (método interno del NMI VL292). La cuantificación de 18 aminoácidos (alanina, arginina, ácido aspártico, ácido glutámico, glicina, histidina, hidroxiprolina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, taurina, treonina, tirosina y valina) se realizó mediante hidrólisis de las muestras en HCl 6 M, seguida de cromatografía líquida de ultra rendimiento acoplada a detección por arreglo de fotodiodos y espectrometría de masas en tándem (UPLC-PDA-MS/MS), utilizando estándares de aminoácidos (método interno del NMI VL450) (Stone et al. 2022, Camperio et al. 2025).

Análisis de metales pesados y seguridad microbiológica

El análisis de metales pesados (Sb, As, Cd, Cu, Pb, Hg, Se, Sn y Zn) fue realizado por el NMI mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), de acuerdo con el método interno NT2-46 del NMI. Las muestras fueron homogeneizadas y digeridas utilizando ácido nítrico y ácido clorhídrico. Posteriormente, las muestras fueron diluidas con agua Milli-Q (Millipore, Burlington, EE. UU.) y nuevamente diluidas, cuando fue necesario, antes del análisis por ICP-MS (Taylor 2023). Los contaminantes microbiológicos se evaluaron mediante los siguientes métodos. El recuento total de coliformes se determinó mediante el método del número más probable (método interno VM1.09C del NMI); el recuento estándar en placa se realizó para evaluar bacterias anaerobias a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (método interno VM1.22A del NMI); las levaduras y mohos se cuantificaron en agar DRBC y expresados como $\text{UFC} \cdot \text{g}^{-1}$ (método interno VM1.28A del NMI); y el recuento de esporas mesófilas se realizó a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (método interno VM1.22C del NMI). La detección de *Salmonella* spp. se realizó mediante el método de ensayo fluorescente ligado a enzimas (ELFA) (VM1.20B).

RESULTADOS

Composición nutricional

Ecklonia radiata y *Cladophora* sp. presentaron bajos contenidos de grasa total (1.56% y 1.8%, respectivamente) y grasa saturada (0.78% y 0.9%, respectivamente). El contenido de cenizas fue notablemente mayor en *Cladophora* sp. (60.9%) que en *E. radiata* (27.34%). La fracción de carbohidratos fue más alta en *E. radiata* (62.48%) que en *Cladophora* sp. (20%). En relación con los compuestos bioactivos, *Cladophora* sp. se destacó por su contenido de β -caroteno ($180 \mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$), el cual estuvo ausente en *E. radiata* (Tabla 1). Considerando la suma de los demás componentes (grasa, cenizas y carbohidratos), el contenido de proteínas se estimó entre 10% y 11% en ambas especies.

Composición de aminoácidos

El contenido de proteínas fue estimado en 10.16% PS para *E. radiata* y en 11.1% PS para *Cladophora* sp. Tras el ajuste a PS, *E. radiata* presentó $3,155 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ PS de aminoácidos esenciales (AAE), principalmente lisina, treonina y leucina, y $4,524 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ PS de aminoácidos no esenciales (AANE), dominados por ácido glutámico, ácido aspártico y alanina. En comparación, *Cladophora* sp. presentó contenidos totales de $3,555 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ PS de AAE y $5,690 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ PS de AANE. Entre los AAE predominantes se identificaron arginina, lisina y leucina, mientras que el perfil de AANE estuvo dominado por ácido glutámico, ácido aspártico y alanina (Fig. 2).

Tabla 1. Composición proximal ($\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ de peso seco [PS]) y contenido de carotenoides ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$) en la biomasa de *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp.

Componente	<i>Ecklonia radiata</i>	<i>Cladophora</i> sp.
Grasa total	1.56	1.80
Grasa saturada	0.78	0.90
Cenizas	27.34	60.90
Carbohidratos	62.48	20.00
Energía ($\text{kJ} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	1,250.00	590.00
Proteínas	10.16	11.10
β -caroteno ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	<5.00	180.00
α -caroteno ($\mu\text{g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)	<5.00	<5.00

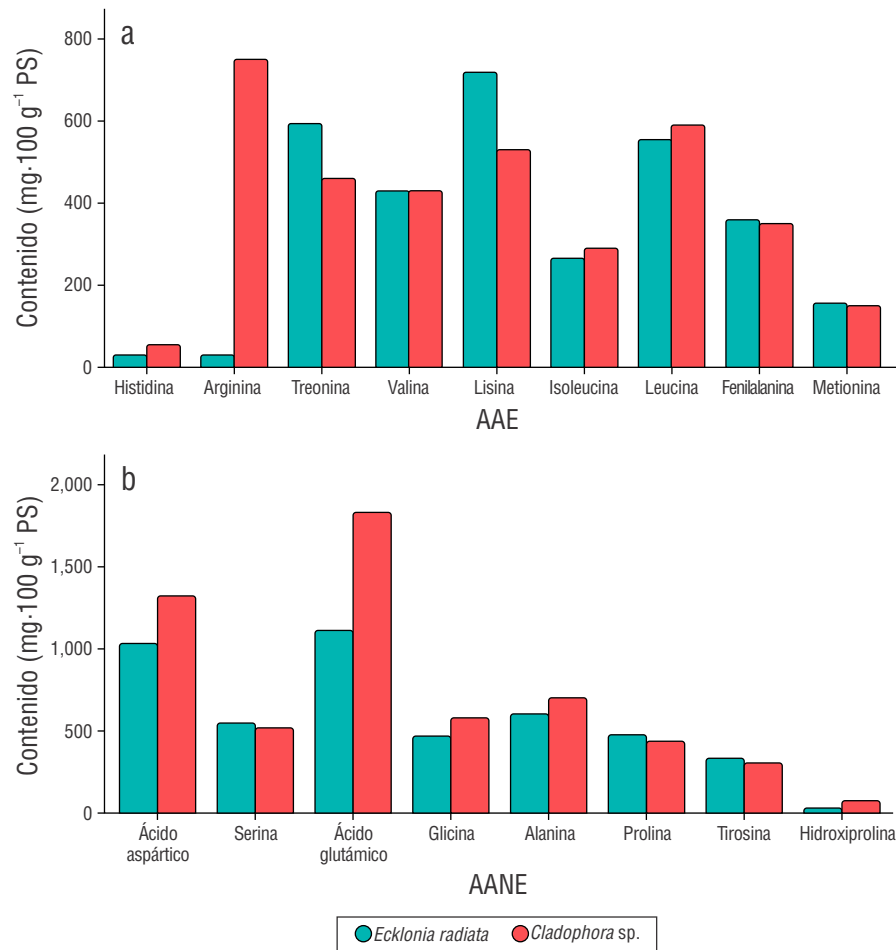


Figura 2. Perfiles de aminoácidos de *Ecklonia radiata* y *Cladophora sp.* Aminoácidos esenciales (AAE) (a); aminoácidos no esenciales (AANE) (b). Los valores (mg·100 g⁻¹ de peso seco [PS]) corresponden a determinaciones analíticas composicionales. En general, ambas especies presentan perfiles de aminoácidos diversificados, con niveles más altos de ácido glutámico y ácido aspártico entre los AANE, y de lisina y leucina entre los aminoácidos esenciales AAE.

El análisis de la composición de AAE y AANE en *E. radiata* y *Cladophora sp.* reveló perfiles bioquímicos distintos y complementarios. *Ecklonia radiata* presentó mayores concentraciones de AAE, como lisina (718.52 mg·100 g⁻¹ PS), leucina (554.51 mg·100 g⁻¹ PS), y treonina (593.56 mg·100 g⁻¹ PS), los cuales son aminoácidos esenciales para la síntesis de proteínas, el mantenimiento de los tejidos musculares y conectivos, el equilibrio metabólico y el soporte del sistema inmunológico, lo que confiere a esta especie un perfil proteico de alto valor nutricional (Wunderle et al. 2024). Por otro lado, *Cladophora sp.* presentó un alto contenido de arginina (750 mg·100 g⁻¹ PS), mientras que este aminoácido no fue detectado en *E. radiata*. Además, *Cladophora sp.* presentó mayores concentraciones de los AANE ácido glutámico (1,800 mg·100 g⁻¹ PS) y ácido aspártico (1,300 mg·100 g⁻¹ PS).

Composición de ácidos grasos

El análisis del perfil de ácidos grasos reveló que *E. radiata* presentó un mayor contenido de ácidos grasos saturados (61%) que *Cladophora sp.* La fracción saturada estuvo compuesta principalmente por ácido butírico (C4:0, 37%), ácido palmítico (C16:0, 14%), ácido mirístico (C14:0, 5%), ácido esteárico (C18:0, 3.5%) y ácido araquídico (C20:0, 1.4%). En contraste, *Cladophora sp.* presentó un 47% de ácidos grasos saturados, dominados principalmente por ácido palmítico (31%) y ácido mirístico (11%), mientras que el ácido butírico (0.3%) y el ácido esteárico (3.2%) estuvieron presentes en menores proporciones. La fracción de ácidos grasos monoinsaturados (AGMI) en *E. radiata* representó el 18% del total de ácidos grasos y estuvo compuesta principalmente

por ácido oleico (C18:1, 12%) y ácido palmitoleico (C16:1, 4%). *Cladophora* sp. presentó un mayor contenido de AGMI (28%) que *E. radiata*, siendo el ácido oleico (13%), el ácido vaccénico (C18:1 trans, 9.3%) y el ácido palmitoleico (5.4%) los componentes predominantes.

Los AGPI representaron el 21% de los ácidos grasos en *E. radiata*, con importantes contribuciones de los ácidos grasos omega-3 ácido eicosapentaenoico (EPA) (C20:5 ω -3, 9.3%) y ácido estearidónico (C18:4 ω -3, 2.9%), así como de los ácidos grasos omega-6 ácido linoleico (C18:2 ω -6, 3.1%), ácido eicosadienoico (C20:2 ω -6, 2.8%) y ácido docosadienoico (C22:2 ω -6, 3.2%). En *Cladophora* sp., los AGPI representaron el 24% de los ácidos grasos, aunque con un contenido de EPA notablemente menor (1%) que en *E. radiata*. En esta especie, los ácidos linoleico (9.1%) y eicosadienoico (9.5%) fueron los componentes poliinsaturados predominantes. Finalmente, *E. radiata* presentó un perfil lipídico altamente enriquecido en ácidos grasos omega-3 (omega-3 [89%] frente a omega-6 [12%]), mientras que en *Cladophora* sp. la distribución entre ácidos grasos omega-3 (13%) y omega-6 (10%) fue más equilibrada (Fig. 3).

Niveles de metales pesados y análisis microbiológico

El análisis de elementos traza reveló diferencias claras en la bioacumulación entre *E. radiata* y *Cladophora* sp. (Tabla 2). *Cladophora* sp. presentó concentraciones considerablemente más altas de Cd (63.0 mg·kg⁻¹), Cu (11.0 mg·kg⁻¹) y Zn (37.0 mg·kg⁻¹) en comparación con *E. radiata*. En contraste, *E. radiata* presentó una concentración marcadamente más alta de Pb (32 mg·kg⁻¹) que *Cladophora* sp.

La calidad microbiológica difirió considerablemente entre la biomasa de *E. radiata* y *Cladophora* sp. *Ecklonia radiata*

Tabla 2. Concentraciones de elementos traza en muestras de *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp. Los resultados se expresan en mg·kg⁻¹ de peso seco (PS) y fueron determinados mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los elementos analizados fueron Sb, As, Cd, Cu, Pb, Hg, Se, Sn y Zn.

Elemento	<i>Ecklonia radiata</i>	<i>Cladophora</i> sp.
Sb	<0.01	<0.02
As	3.20	4.0
Cd	0.37	63.0
Cu	0.61	11.0
Pb	32.0	5.70
Hg	<0.01	<0.01
Se	<0.05	0.73
Sn	<0.02	0.22
Zn	2.80	37.0

presentó menores cargas microbianas, con un recuento estándar en placa de 30 UFC·g⁻¹ en condiciones anaerobias, mientras que *Cladophora* sp. presentó un recuento de 10,000 UFC·g⁻¹. La cantidad de esporas mesófilas también fue menor en *E. radiata* (10 UFC·g⁻¹) que en *Cladophora* sp. (7,200 UFC·g⁻¹). Los recuentos de levaduras y mohos fueron <100 UFC·g⁻¹ y 100 UFC·g⁻¹ en *E. radiata*, respectivamente, mientras que *Cladophora* sp. presentó recuentos de 3,000 UFC·g⁻¹ y 500 UFC·g⁻¹, respectivamente (Tabla 3). La biomasa de ambas especies presentó resultados negativos para *Salmonella* (no detectada) y coliformes, indicando el cumplimiento de estándares básicos de seguridad. *Ecklonia radiata* presentó una mejor calidad microbiológica en comparación con *Cladophora* sp., con recuentos sustancialmente menores de esporas mesófilas, levaduras, mohos y bacterias anaerobias.

DISCUSIÓN

Las macroalgas han sido reconocidas por su potencial nutricional debido a sus diversas y específicas composiciones bioquímicas, las cuales presentan perfiles distintos de proteínas, carbohidratos, lípidos, minerales y compuestos bioactivos que determinan su adecuación para diferentes aplicaciones alimentarias y funcionales (Marques et al. 2021). Por ejemplo, Marques et al. (2021) evaluaron mezclas comerciales de macroalgas en Europa y reportaron contenidos de proteínas entre 17.79% y 26.61% PS, así como contenidos de carbohidratos entre 39.47% y 47.37% PS. Estos resultados evidencian que las mezclas de macroalgas pueden representar excelentes alternativas nutricionales (Marques et al. 2021). Específicamente, el contenido de proteínas en *E. radiata* ha sido reportado entre 5.6% y 7.6% PS (Nepper-Davidsen et al. 2023), mientras que en especies de *Cladophora* se han registrado valores entre 14.45% y 26.55% PS (Messyasz et al. 2015). Nuestros resultados se encuentran dentro o próximos a estos intervalos reportados, considerando posibles variaciones relacionadas con la metodología, factores ambientales y dinámicas estacionales. Aunque en este estudio no se evaluaron mezclas de macroalgas, el potencial nutricional fue analizado a nivel de especie con el fin de proporcionar una comprensión general de los perfiles nutricionales específicos de *E. radiata* y *Cladophora* sp.

Los resultados mostraron que *E. radiata* y *Cladophora* sp. presentaron características complementarias en términos de perfiles funcionales de carbohidratos, aminoácidos y lípidos. Si el objetivo es proporcionar altos niveles de proteínas, cada especie presenta una capacidad limitada cuando se considera de manera individual. Sin embargo, una mezcla de *E. radiata* y *Cladophora* sp. podría equilibrar estratégicamente las propiedades nutricionales. En este sentido, futuros estudios deberían evaluar mezclas de estas especies para determinar si sus distintas características nutricionales pueden traducirse en un perfil nutricional general más equilibrado.

Tanto *E. radiata* como *Cladophora* sp. presentaron bajos contenidos totales de lípidos (<1.56% y 1.8% PS,

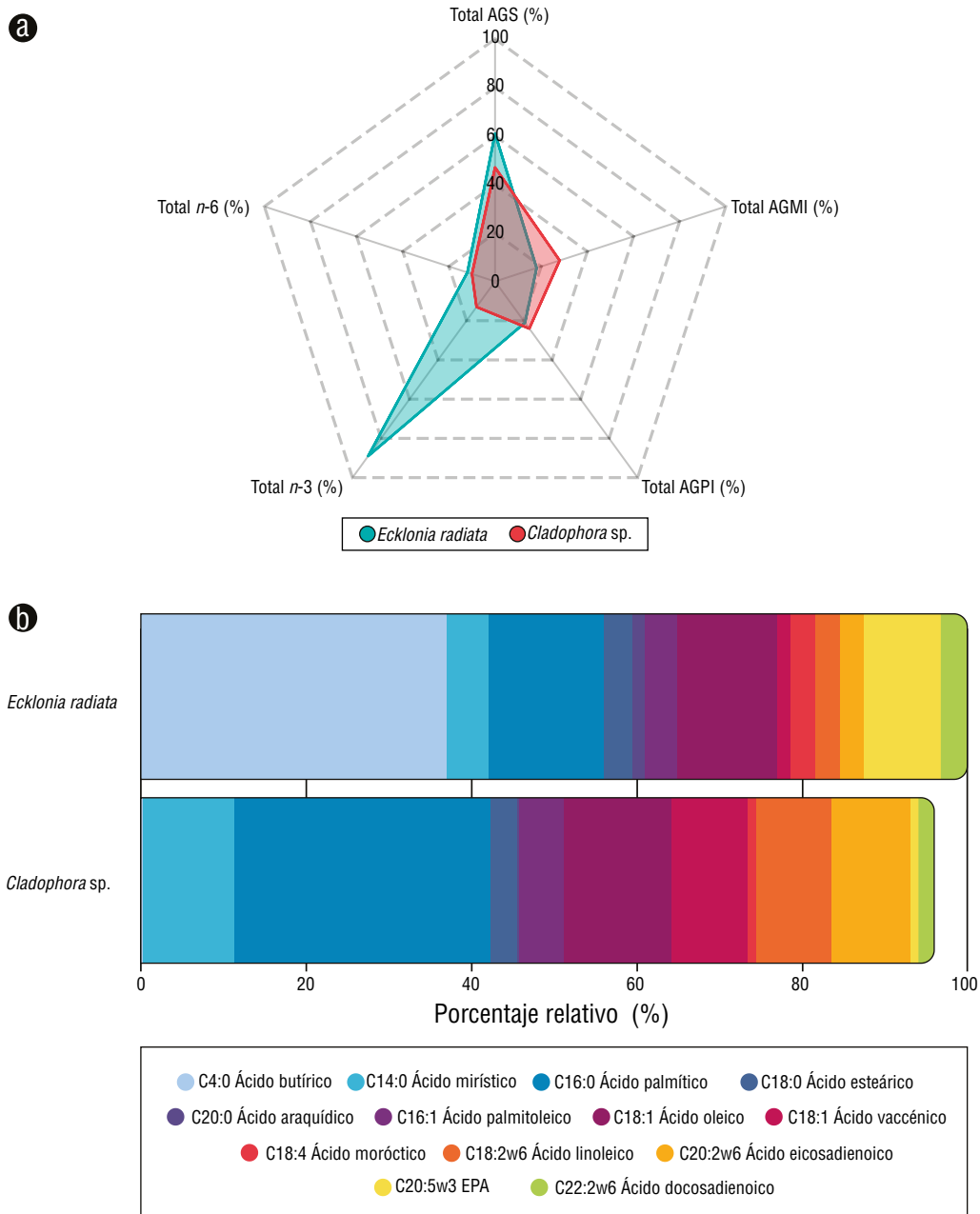


Tabla 3. Análisis de calidad microbiológica de *Ecklonia radiata* y *Cladophora* sp. basado en recuentos estándar de bacterias anaerobias, coliformes, *Salmonella* spp., esporas mesófilas, levaduras y hongos. Los resultados se expresan como unidades formadoras de colonias por gramo (UFC·g⁻¹) o número más probable por gramo (MPN·g⁻¹). ND indica no detectado. Las variables evaluadas fueron utilizadas para determinar la calidad microbiológica y seguridad de ambas especies de macroalgas.

Indicador de calidad microbiológica	<i>Ecklonia radiata</i>	<i>Cladophora</i> sp.
Bacterias anaerobias	30 UFC·g ⁻¹	10,000 UFC·g ⁻¹
Coliformes	<1 MPN·g ⁻¹	<1 MPN·g ⁻¹
<i>Salmonella</i> spp.	ND	ND
Esporas mesófilas	10 UFC·g ⁻¹	7,200 UFC·g ⁻¹
Levaduras	<100 UFC·g ⁻¹	3,000 UFC·g ⁻¹
Hongos	100 UFC·g ⁻¹	500 UFC·g ⁻¹

respectivamente), valores ligeramente superiores o dentro del intervalo reportado para mezclas comerciales de macroalgas en Europa (0.55-1.50% PS) (Marques et al. 2021). Este resultado coincide con el perfil bioquímico típico de las macroalgas, en las cuales los lípidos representan una fracción menor de la biomasa seca. A pesar de su baja proporción, los lípidos de macroalgas han sido reconocidos por su alta calidad y por su contenido de AGPI de cadena larga bioactivos, incluidos los ácidos grasos *n-3* y *n-6*, los cuales presentan efectos beneficiosos sobre la salud cardiovascular (Schmid et al. 2014).

El contenido de cenizas actúa como un indicador indirecto de la carga mineral total presente en la biomasa de macroalgas, reflejando la proporción de nutrientes inorgánicos en relación con la materia orgánica (Beacham et al. 2019). En este contexto, *Cladophora* sp. presentó un alto contenido de cenizas (60.9% PS), valor que se encontró dentro o incluso por encima del intervalo típico reportado para macroalgas de consumo común. Por ejemplo, el contenido de cenizas de las macroalgas verdes estudiadas por Barot et al. (2019) varió entre 20 ± 0.2% y 50 ± 0.5%, lo que representa una carga mineral considerablemente alta característica de especies provenientes de ambientes dulceacuícolas o estuarinos, donde la bioacumulación de minerales disueltos suele intensificarse (Rybak et al. 2012).

En contraste, *E. radiata* presentó un contenido de cenizas de 27.34% PS, valor consistente con el intervalo reportado para macroalgas pardas como Badderlocks (*Alaria esculenta*; 33.0% PS) (Schiener et al. 2015) y Bladderwrack (*Fucus vesiculosus*; 25.5% PS) (Neto et al. 2018). Sin embargo, este valor fue ligeramente superior al intervalo reportado por

Nepper-Davidsen et al. (2023) para *E. radiata* (16.2-25.1% PS, *n* = 72), lo que probablemente refleja condiciones ambientales específicas del sitio, variación estacional o diferencias metodológicas en el muestreo y procesamiento.

Se ha reportado que el contenido de proteínas en macroalgas varía entre 5% y 47% PS (Thiviya et al. 2022), mientras que las especies analizadas en el presente estudio se ubicaron dentro del intervalo inferior (10-11% PS) (Tabla 1). Un estudio reciente realizado con *E. radiata* recolectada en Nueva Zelanda reportó un contenido de proteínas de 7.1% (Hrstich-Manning y Aguirre 2025). El contenido de proteínas en *Cladophora* glomerata ha mostrado variaciones dependiendo del método analítico utilizado. Manivannan et al. (2009) reportaron un contenido de proteínas de 20.38% en *C. glomerata* utilizando el método de Biuret, mientras que Akköz et al. (2011) reportaron 14.13% mediante el método de Kjeldahl. Nutautaitė et al. (2021) demostraron que el contenido de proteína cruda en *C. glomerata* fue considerablemente variable (19.2-24.2% PS) dependiendo de la fuente de biomasa. Estas variaciones resaltan la importancia del método analítico, así como de las características específicas de la especie y de las condiciones ambientales, en la determinación del contenido de proteínas en macroalgas.

Las proteínas de las macroalgas constituyen una fuente de AAE y AANE y contienen niveles particularmente altos de glicina, alanina, arginina, prolina, ácido glutámico y ácido aspártico (Černá 2011). Además, las macroalgas contienen aminoácidos como valina, leucina, isoleucina y taurina, los cuales pueden presentar propiedades antioxidantes (El-Beltagi et al. 2022). Los aminoácidos son esenciales para la síntesis de hormonas y compuestos nitrogenados de bajo peso molecular, los cuales desempeñan importantes funciones biológicas (El-Beltagi et al. 2022). Es importante destacar que el contenido de proteínas en macroalgas varía ampliamente según la especie, la estación y la ubicación geográfica, y puede alcanzar hasta 45% PS en algunos casos (Mouritsen et al. 2019).

La evaluación del perfil de aminoácidos de la biomasa de macroalgas constituye un paso fundamental desde las perspectivas nutricional, sensorial y funcional. Desde el punto de vista nutricional, el perfil de aminoácidos es necesario para evaluar la calidad proteica de los alimentos, particularmente la presencia y proporción de AAE requeridos para el metabolismo humano (Calvez et al. 2024). El análisis de aminoácidos es especialmente relevante frente a la creciente demanda de alternativas alimentarias más sostenibles (Marques et al. 2021), como las macroalgas, las cuales son cada vez más reconocidas como fuentes prometedoras de proteínas, particularmente en un contexto de transición hacia dietas con menor impacto ambiental.

En el presente estudio, *Cladophora* sp. presentó un mayor contenido de L-arginina en comparación con *E. radiata*. La L-arginina desempeña funciones biológicas esenciales y participa en la biosíntesis de proteínas, la modulación de la respuesta inmune y el ciclo de la urea. Además, constituye un

precursor clave en la síntesis de óxido nítrico, un importante vasodilatador endógeno asociado con efectos beneficiosos sobre la función cardiovascular e inmunológica (Gambardella et al. 2020). El ácido glutámico y el ácido aspártico fueron los aminoácidos predominantes en *Cladophora* sp. y *E. radiata*, destacando su potencial relevancia biológica y funcional. Ambos aminoácidos actúan como neurotransmisores excitatorios en el sistema nervioso central y desempeñan funciones esenciales en la transmisión sináptica y la comunicación neuronal (Qu et al. 2023). El ácido aspártico participa activamente en la síntesis de otros aminoácidos y en la producción de energía celular, mientras que el ácido glutámico es esencial para procesos cognitivos como el aprendizaje y la memoria (Zhang et al. 2008). Además, el ácido glutámico contribuye a las características sensoriales y es directamente responsable del sabor umami, el cual se asocia con una mayor palatabilidad de los alimentos (Ghirri y Bignetti 2012). Estos resultados sugieren que *E. radiata* constituye una fuente proteica más adecuada para la suplementación de aminoácidos esenciales, mientras que *Cladophora* sp. presenta un perfil biofuncional orientado a aplicaciones metabólicas, neuromoduladoras y sensoriales, además de representar una potencial fuente funcional de arginina. Por esta razón, *Cladophora* sp. podría incorporarse en mezclas con otras macroalgas o ingredientes complementarios con el fin de mejorar el perfil nutricional y las características sensoriales del producto final.

El uso de macroalgas como fuente de proteínas en alimentos para organismos acuáticos representa un desafío, principalmente debido a sus bajas concentraciones de AAE, más que a la calidad global de sus proteínas (Maehre et al. 2014). En este sentido, las macroalgas presentan limitaciones como fuente proteica para dietas de animales monogástricos, especialmente en comparación con fuentes convencionales como el maíz y la soya. Otro factor restrictivo es su elevado contenido de humedad (64.9-94.0%), lo que requiere mayores cantidades de biomasa fresca para alcanzar niveles de materia seca equivalentes a los obtenidos con ingredientes terrestres (Wan et al. 2019).

No obstante, diversos estudios han destacado los beneficios de la inclusión de macroalgas en dietas para peces, reportando efectos positivos sobre la palatabilidad, digestibilidad, inmunidad, funcionalidad y desempeño de crecimiento (Glencross 2020, Ngoepe et al. 2024). Černá (2011) confirmó que, en comparación con las proteínas convencionales, las proteínas de macroalgas, al igual que las proteínas vegetales, no constituyen proteínas completas, debido a sus bajas concentraciones de determinados aminoácidos.

Además del valor nutricional, el contenido de aminoácidos libres y unidos a proteínas influye directamente en las propiedades organolépticas de los alimentos, especialmente en el desarrollo de sabores como el umami. Este aspecto fue investigado en detalle por Mouritsen et al. (2019), quienes analizaron 20 especies pertenecientes a 12 géneros de macroalgas pardas consumidas a nivel mundial, incluyendo *Nereocystis*, *Macrocystis*, *Laminaria*, *Saccharina*, *Undaria*, *Alaria*,

Postelsia, *Himanthalia* y *Ecklonia* (anteriormente *Eisenia*). Al analizar el perfil de aminoácidos de *Ecklonia bicyclis*, se observó un claro predominio de los AANE sobre los AAE, tanto en diversidad como en concentración total. Entre los AANE, destacaron alanina, glicina y prolina, las cuales constituyeron la mayor fracción del contenido total y contribuyeron a las propiedades sensoriales, particularmente a notas dulces y suaves. El ácido glutámico, también clasificado como un AANE, fue detectado y asociado con el sabor umami.

En un estudio reciente, la variación espaciotemporal en la composición de aminoácidos de la biomasa de *E. radiata* fue cuantificada utilizando muestras recolectadas en 12 sitios de la Isla Norte de Nueva Zelanda y muestras obtenidas mensualmente en un mismo sitio durante un año ($n = 138$) (Nepper-Davidsen et al. 2023). Los resultados revelaron que el ácido glutámico y el ácido aspártico fueron los más abundantes, representando conjuntamente más del 30% del contenido total. Sus niveles variaron entre 1.0-1.7% y 0.7-1.0% de la biomasa seca, respectivamente, indicando un perfil proteico de alto valor nutricional, especialmente relacionado con el metabolismo celular y la generación de sabores tipo umami (Nepper-Davidsen et al. 2023).

Los estudios sobre perfiles de aminoácidos en *Cladophora* spp. son más frecuentes que aquellos realizados en *Ecklonia* spp. Sin embargo, puede existir una variabilidad considerable entre diferentes especies e incluso entre muestras de biomasa de una misma especie, como fue demostrado por Nutautaitė et al. (2021). El objetivo de dicho estudio fue evaluar el uso potencial de *C. glomerata* de agua dulce como fuente alternativa de proteínas y otros nutrientes esenciales para la alimentación animal. Para ello, Nutautaitė et al. (2021) realizaron un análisis químico integral de muestras de biomasa recolectadas en diferentes localidades, con el fin de evaluar su composición nutricional y su potencial aplicabilidad. El perfil de aminoácidos de *C. glomerata* reveló que los aminoácidos más abundantes fueron el ácido glutámico ($14.16-19.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), el ácido aspártico ($10.90-15.97 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), la glicina ($8.06-11.46 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), la alanina ($8.12-10.73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y la leucina ($9.64-12.01 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), los cuales desempeñan funciones esenciales en el metabolismo y contribuyen a propiedades sensoriales como el sabor umami y dulce. De manera notable, los AAE como lisina ($5.76-7.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), isoleucina ($5.94-7.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), valina ($8.39-10.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y fenilalanina ($6.37-8.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) estuvieron presentes en cantidades relevantes, respaldando el valor nutricional de la biomasa, ya que son esenciales en la dieta humana y desempeñan funciones clave en la síntesis de proteínas y procesos metabólicos.

En otro estudio enfocado en *Cladophora vagabunda*, el perfil de aminoácidos fue analizado con el objetivo de investigar compuestos orgánicos que actúan como osmólitos y permiten a esta alga intermareal adaptarse a un amplio intervalo de condiciones de salinidad (Rani 2007). Los principales aminoácidos identificados fueron aspartato, glutamato, glicina, valina, lisina, histidina, arginina y prolina. De manera notable, el aspartato, el glutamato y algunos AAE (i.e., lisina,

histidina y arginina) presentaron un incremento simultáneo en respuesta al estrés salino. Estos hallazgos respaldan aún más la idea de que las condiciones ambientales pueden influir considerablemente en la composición de aminoácidos, destacando la plasticidad metabólica de especies de *Cladophora* frente a factores de estrés externos. De manera similar, Pikosz et al. (2019) investigaron el perfil de aminoácidos de *C. glomerata* y *Cladophora fracta* bajo condiciones de estrés químico, con el fin de identificar cuáles aminoácidos presentaban variaciones notables y si dicha variabilidad reflejaba respuestas adaptativas.

En *C. fracta* y *C. glomerata*, los aminoácidos más abundantes fueron el ácido glutámico, el ácido aspártico y la leucina (Pikosz et al. 2019). En respuesta al incremento en las concentraciones de exudados químicos, se observó una acumulación notable de prolina y triptófano, lo que sugiere que estos aminoácidos desempeñan funciones relacionadas con la mitigación del estrés (Pikosz et al. 2019). La abundancia relativa de aminoácidos en *C. fracta* presentó el siguiente orden: ácido glutámico > ácido aspártico > leucina > arginina > valina > alanina > glicina > lisina > treonina > serina > prolina > fenilalanina > isoleucina > tirosina > histidina > cisteína > metionina > triptófano. *Cladophora glomerata* presentó un patrón similar: ácido glutámico > ácido aspártico > leucina > arginina > valina > alanina > glicina > lisina > treonina > prolina > serina > fenilalanina > isoleucina > tirosina > histidina > cisteína > metionina > triptófano (Pikosz et al. 2019). Estos patrones refuerzan el papel predominante de los aminoácidos ácidos en el perfil proteico de especies de *Cladophora*, al tiempo que destacan la capacidad de ciertos aminoácidos, como prolina y triptófano, para actuar como marcadores bioquímicos de respuesta al estrés.

Messyasz et al. (2015) reportaron el perfil de aminoácidos de biomasa de *C. glomerata*, expresado en g:100 g⁻¹ de proteína total. En dicho estudio, el ácido glutámico y el ácido aspártico fueron los aminoácidos más abundantes en las muestras recolectadas en ambiente lacustre. Adicionalmente, la biomasa fue identificada como una fuente rica de arginina, leucina, alanina, glicina y valina, destacando su potencial valor nutricional (Messyasz et al. 2015). Cabe señalar que debe tenerse precaución al comparar datos entre diferentes especies de macroalgas y entre muestras de una misma especie provenientes de distintas regiones o condiciones, ya que la composición de aminoácidos puede variar considerablemente dependiendo del ambiente de cultivo y del periodo de cosecha.

Los lípidos en macrófitas marinas están compuestos predominantemente por fosfolípidos y glicolípidos (Alghazeer et al. 2022). Bajos niveles de lípidos de ~1-6% PS han sido reportados consistentemente en diferentes taxones (Biris-Dorhoi et al. 2020, Alghazeer et al. 2022). En *E. radiata*, el contenido lipídico varió entre 0.1% y 1.6% PS ($n = 72$), siguiendo un patrón estacional unimodal, con los niveles más altos observados entre finales de la primavera austral e inicios del verano y los niveles más bajos durante el otoño y el invierno austral

(Nepper-Davidsen et al. 2023). A pesar de su bajo contenido lipídico total, las macroalgas son particularmente ricas en AGPI, incluidos AGPI de cadena larga (Schmid et al. 2014). Estos compuestos bioactivos son ampliamente reconocidos por sus propiedades promotoras de la salud, incluyendo actividades antiinflamatorias, antioxidantes y potencialmente anticancerígenas (Coudray et al. 2021).

En el presente estudio, *E. radiata* destacó por su alto contenido de ácidos grasos saturados, especialmente ácido butírico (37%), un ácido graso de cadena corta raramente reportado como abundante en macroalgas. Desde un punto de vista funcional, el ácido butírico desempeña diversas funciones fisiológicas importantes, incluyendo el suministro de energía para las células del colon y la regulación de la proliferación celular. Además, promueve el desarrollo intestinal, mantiene la salud y funcionalidad intestinal, fortalece la respuesta inmune y presenta propiedades antitumorales y antioxidantes (Załęski et al. 2013). Además, el notable contenido de EPA (9.3%), un ácido graso omega-3 esencial, posiciona a *E. radiata* como una valiosa fuente de lípidos bioactivos para aplicaciones antiinflamatorias, cardioprotectoras y neuroprotectoras. Estudios previos han indicado que la ingesta de EPA puede beneficiar el desarrollo neuropsicomotor en niños, mejorar la atención en individuos con trastorno por déficit de atención e hiperactividad y reducir la pérdida de espesor cortical en pacientes con esquizofrenia (Souto et al. 2022). En adultos mayores, el EPA ha sido asociado con una mayor oxigenación cerebral y con una disminución en la pérdida de masa cerebral en casos de demencia (Souto et al. 2022).

La elevada proporción de omega-3 en relación con omega-6 (89% vs. 12%) observada en *E. radiata* en el presente estudio representa una característica nutricional relevante. La incorporación de macroalgas en la dieta puede contribuir de manera importante al aporte de AGPI, los cuales suelen ser deficientes en dietas occidentales con bajo consumo de pescado, principal fuente de estos ácidos grasos, debido a aspectos relacionados con el sabor, el costo o la estabilidad de los productos derivados (Mišurová et al. 2011).

En *Cladophora* sp., el ácido graso saturado predominante fue el ácido palmítico, el cual actúa como fuente de energía y es esencial para la estructura y funcionalidad de las membranas celulares. Además, el ácido palmítico presenta propiedades antiinflamatorias, antioxidantes e inmunomoduladoras (Wang et al. 2023). Asimismo, la fracción de AGMI en *Cladophora* sp. fue más representativa que en *E. radiata*, confiriéndole un perfil lipídico particularmente interesante. Los AGMI han sido asociados con diversos beneficios para la salud, especialmente con la reducción del riesgo cardiovascular, y se ha observado que dietas ricas en AGMI disminuyen la necesidad de insulina y reducen los niveles plasmáticos de glucosa e insulina en pacientes con diabetes tipo 2 (López-Miranda et al. 2006).

La proporción relativamente equilibrada de omega-3 (13%) y omega-6 (10%) observada en *Cladophora* sp. representa una

característica nutricional relevante. Este balance lipídico se aproxima a los perfiles considerados ideales para dietas orientadas a la prevención de enfermedades inflamatorias y cardiovasculares. Este equilibrio refuerza el potencial funcional de esta biomasa, tanto en la formulación de alimentos enfocados en la salud metabólica y cardiovascular como en el desarrollo de productos dirigidos al cuidado de la piel, donde es necesario mantener un perfil adecuado de AGPI (Patel et al. 2022). Asimismo, es importante destacar que otros ácidos grasos funcionales fueron detectados en *Cladophora* sp., reforzando aún más su relevancia nutricional. Por ejemplo, el ácido transvaccénico (9.3%), identificado en *Cladophora* sp. en el presente estudio, ha sido asociado con propiedades metabólicas e inmunomoduladoras beneficiosas en un estudio previo realizado por Fan et al. (2023). Este estudio demostró que el ácido transvaccénico puede potenciar la función de las células T CD8⁺ y la inmunidad antitumoral, destacando su potencial papel en la regulación inmunológica y la salud metabólica (Fan et al. 2023). Aunque este ácido graso ha sido reportado con mayor frecuencia en lípidos de origen animal, su presencia también ha sido descrita en macroalgas marinas (Marques et al. 2021).

Finalmente, es importante destacar que el notable contenido de β -caroteno presente en *Cladophora* sp. ($180 \mu\text{g} \cdot 100 \text{g}^{-1}$) en el presente estudio incrementa aún más su valor nutricional. Los carotenoides constituyen una de las 3 principales clases de antioxidantes presentes en macroalgas, junto con vitaminas y polifenoles (Jacobsen et al. 2019), y actúan como potentes antioxidantes, contribuyendo a la protección celular frente al estrés oxidativo (Krinsky 2001). Adicionalmente, los carotenoides actúan como precursores de vitamina A, la cual es esencial para el mantenimiento de la salud ocular, el adecuado funcionamiento del sistema inmunológico y el bienestar fisiológico general (Meléndez-Martínez 2019).

La absorción de elementos traza y metales pesados por las macroalgas está influenciada por factores como su presencia en el ambiente y la capacidad intrínseca de absorción de cada especie (FAO 2022b). Los resultados del presente estudio sugieren variaciones en la acumulación de elementos traza entre las especies de macroalgas, reflejando probablemente sus distintas características taxonómicas, vías metabólicas y nichos ecológicos (Špoljarić et al. 2021). La concentración extremadamente alta de Cd detectada en *Cladophora* sp. ($63.0 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) resulta particularmente preocupante. Investigaciones recientes indican que *C. fracta* presenta una mayor capacidad de acumulación de metales pesados, incluido Cd, en comparación con otras macroalgas verdes (Yazılan y Taşkın 2024).

Esta elevada capacidad de bioacumulación ha sido atribuida a la presencia de grupos funcionales específicos en las paredes celulares, los cuales desempeñan un papel clave en la unión de iones Cd²⁺. Además, estudios realizados con *C. glomerata* han sugerido que esta especie presenta una notable tolerancia a concentraciones elevadas de Cd, donde la síntesis de compuestos relacionados con el estrés actúa como biomarcador de estrés oxidativo (Celekli y Bulut 2020). Estos niveles de Cd

pueden superar los límites de seguridad alimentaria establecidos por distintos marcos regulatorios, lo que genera preocupación respecto al uso directo de *C. glomerata* en aplicaciones alimentarias o para alimentación animal sin la implementación de estrategias adecuadas de descontaminación.

El Cu y el Zn son micronutrientes esenciales y presentaron concentraciones más elevadas en *Cladophora* sp. que en *E. radiata* en el presente estudio ($11.0 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ y $37.0 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectivamente). Aunque elevados, estos niveles se encuentran dentro de los intervalos comúnmente reportados para macroalgas verdes (Laib 2012) y pueden contribuir positivamente al valor nutricional de las macroalgas cuando son consumidas dentro de límites seguros. Michalak et al. (2018) demostraron que la biomasa de *Cladophora* enriquecida con oligoelementos a través de la biosorción puede servir como un valioso aditivo para piensos, reemplazando parcialmente las sales inorgánicas convencionales. De manera similar, Michalak et al. (2011) reportaron que una mezcla de biomasa de *Ulva* prolifera y *Cladophora* sp. enriquecida mediante biosorción con Cu(II), Zn(II), Co(II), Mn(II) y Cr(III), al ser incorporada en la dieta de gallinas ponedoras, incrementó las concentraciones de estos elementos en los huevos y mejoró características de calidad, incluyendo el color de la yema, el grosor de la cáscara, el peso del huevo y el peso corporal de las aves.

El plomo fue considerablemente más elevado en *E. radiata* ($32 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) que en *Cladophora* sp. ($5.7 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Esto sugiere mecanismos específicos de absorción de metales entre especies o diferencias en la exposición al hábitat, considerando que las algas pardas (Phaeophyceae) suelen presentar una mayor afinidad por determinados metales pesados, como el Pb, debido a la presencia de alginatos, reconocidos como agentes quelantes de metales (Jung et al. 2009). A pesar de ello, el contenido de Pb en *E. radiata* superó los límites generalmente establecidos para materiales de grado alimentario en algunas jurisdicciones, lo que podría restringir su aplicación en alimentos o nutracéuticos sin procesos previos de purificación. El mercurio y el Sb se encontraron por debajo del límite de detección en ambas especies ($<0.01 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), lo que representa un resultado positivo considerando la elevada toxicidad asociada a estos elementos. El selenio y el Sn fueron detectados únicamente en *Cladophora* sp.; el Se ($0.73 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) podría aportar propiedades antioxidantes beneficiosas dentro de límites seguros de ingesta, mientras que el Sn ($0.22 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) se mantuvo en niveles bajos y probablemente no representa un riesgo para la salud.

El monitoreo microbiológico de muestras de macroalgas es esencial para garantizar la seguridad y calidad de productos destinados al consumo humano o utilizados como ingredientes en suplementos y productos nutricionales (Lytou et al. 2021). Las macroalgas constituyen una materia prima natural susceptible a contaminación en distintas etapas, incluyendo cosecha, transporte, procesamiento y almacenamiento. La presencia excesiva de microorganismos, tales como bacterias patógenas, coliformes, levaduras y hongos, puede estar relacionada con prácticas inadecuadas de manipulación durante

estas etapas o con la calidad del agua donde las macroalgas son recolectadas (Løvdaal 2021). Este tipo de contaminación microbiana puede representar riesgos importantes para la salud de los consumidores, incluyendo enfermedades transmitidas por alimentos, infecciones y reacciones alérgicas (Wu et al. 2022).

A pesar de las diferencias observadas en la carga microbiana total, la ausencia de *Salmonella* y coliformes en *Cladophora* sp. y *E. radiata* sugiere que la biomasa de ambas especies cumplió con estándares microbiológicos básicos de seguridad en relación con contaminación no patógena bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, los mayores recuentos microbianos observados en *Cladophora* sp. podrían requerir etapas adicionales de procesamiento, tales como secado, esterilización o conservación, con el fin de garantizar la seguridad y calidad del producto para potenciales aplicaciones industriales.

Un informe conjunto de la FAO (2022a) destacó que los metales pesados, particularmente As y Cd, los riesgos microbiológicos (por ejemplo, *Salmonella* spp.) y los niveles excesivos de I constituyen las principales preocupaciones de seguridad alimentaria asociadas a productos derivados de macroalgas. Por lo tanto, el monitoreo y control estricto representan obligaciones regulatorias y medidas esenciales para proteger a los consumidores y garantizar que las macroalgas y los productos derivados sean seguros y aptos para el consumo humano. Adicionalmente, se recomienda un monitoreo continuo para respaldar la trazabilidad y facilitar la identificación de fallas en los procesos de producción, permitiendo la implementación oportuna de acciones correctivas dirigidas a mitigar riesgos de contaminación.

La bioseguridad y el manejo sanitario basados en buenas prácticas, prevención de enfermedades y uso responsable de antimicrobianos son esenciales para una acuicultura sostenible. La implementación de estas medidas de manejo requiere estrategias nacionales, cooperación entre las partes involucradas y alineación con estándares internacionales (FAO 2025). Asimismo, muchos de estos riesgos pueden mitigarse mediante buenas prácticas de cultivo, tales como la selección de sitios con baja contaminación, el monitoreo ambiental periódico y la aplicación de procesos controlados de cosecha y poscosecha (FAO 2022a). En sistemas de cultivo en mar abierto, el monitoreo oportuno de la calidad del agua es esencial para la selección de sitios, para priorizar áreas con bajos niveles de metales pesados o, cuando sea posible, para implementar estrategias multitroficas que contribuyan a mitigar contaminantes existentes. En sistemas de cultivo en tierra, como *Cladophora* cultivada en tanques de sedimentación, también debe prestarse especial atención a la calidad del agua de mar utilizada durante el cultivo. En ambos sistemas, la cosecha controlada y el manejo poscosecha continúan siendo fundamentales para garantizar la seguridad del producto. En relación con la contaminación microbiológica, el establecimiento de buenas prácticas de manipulación y protocolos de higiene es necesario para prevenir contaminación cruzada, particularmente por parte

de operadores, reduciendo así el riesgo de introducción y dispersión de microorganismos a lo largo de la cadena de producción (FAO, WHO 2022b).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el cultivo y valorización de macroalgas representan una vía estratégica para expandir los sistemas alimentarios acuáticos y, al mismo tiempo, reducir la presión ambiental sobre los recursos terrestres (Biris-Dorhoi et al. 2020). Más allá de sus servicios ecosistémicos ampliamente documentados, tales como secuestro de carbono, biorremediación de nutrientes y protección costera, los perfiles químicos validados en este estudio refuerzan su relevancia dentro de un marco de bioeconomía sostenible (Duarte et al. 2017, Racine et al. 2021). La predominancia de aminoácidos bioactivos, nutrientes esenciales y compuestos funcionales en *E. radiata* y *Cladophora* sp. destaca su doble función como fuentes de biomasa ambientalmente eficientes y reservorios bioquímicos de alto valor. En este sentido, la integración de su composición química validada con prácticas de acuicultura escalables respalda un modelo de producción climáticamente positivo, capaz de suministrar ingredientes alimentarios con una menor huella ecológica (Koroma et al. 2025). Bajo esta perspectiva, el aprovechamiento sostenible de estas especies trasciende la simple producción de biomasa, posicionándolas como potenciales recursos estratégicos para una innovación ambientalmente responsable en el sector alimentario.

CONCLUSIONES

El análisis nutricional y bioquímico de *E. radiata* y *Cladophora* sp. reveló perfiles distintos, aunque potencialmente complementarios, demostrando su potencial como materias primas sostenibles para el desarrollo de alimentos funcionales. Por un lado, *E. radiata* presentó un alto contenido de carbohidratos y una composición de aminoácidos equilibrada y de alta calidad, particularmente rica en lisina, leucina y treonina, combinada con un perfil lipídico enriquecido en ácidos grasos omega-3, especialmente EPA. Adicionalmente, *E. radiata* presentó buena calidad microbiológica, lo que la convierte en una candidata más segura para su incorporación directa en productos alimentarios. Por otro lado, *Cladophora* sp. se caracterizó por un contenido particularmente alto de cenizas, una concentración sustancial de β -caroteno y elevados niveles de arginina. Sin embargo, su mayor carga microbiana y la acumulación de determinados metales pesados requieren un procesamiento cuidadoso y un estricto control de calidad para mitigar posibles riesgos en aplicaciones alimentarias. Considerando que ambas especies presentaron atributos nutricionales valiosos, así como ciertas limitaciones, particularmente los mayores niveles de contaminantes observados en *Cladophora* sp., las formulaciones combinadas podrían representar una estrategia prometedora para optimizar sus beneficios nutricionales, mejorar sus propiedades funcionales y promover la producción sostenible de ingredientes alimentarios.

Al mismo tiempo, los resultados obtenidos en el presente estudio pueden servir como referencia útil para productores y actores de la industria, especialmente en relación con las condiciones de cultivo, el monitoreo de la calidad de la biomasa y las prácticas de manejo poscosecha. Estos hallazgos pueden contribuir a mejorar estrategias de manejo de cultivo, monitoreo de contaminantes y procesamiento, fortaleciendo la relevancia aplicada del estudio, particularmente en la garantía de seguridad y calidad de biomasa de macroalgas destinada al consumo humano o animal.

Nuestros hallazgos destacan el potencial nutricional de ambas especies y sus atributos nutricionales distintivos, constituyendo un primer paso hacia la exploración de su posible utilización en el sector alimentario. Aunque los resultados obtenidos no evaluaron directamente mezclas entre ambas macroalgas, sí sugieren el potencial uso estratégico de ambas especies en formulaciones sinérgicas capaces de optimizar beneficios nutricionales, mejorar propiedades funcionales y promover la producción sostenible de ingredientes alimentarios. No obstante, son necesarios estudios específicos que evalúen el perfil nutricional de mezclas formuladas para confirmar si sus características complementarias y condiciones de seguridad efectivamente se traducen en un mayor valor agregado y potencial de aplicación.

Traducido al español por los/as autores/as

DECLARACIONES

Material suplementario

Este trabajo no incluye material suplementario.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento al programa *Green Light Accelerator Program* (Cohort 5), promovido por la *University of Technology Sydney*, por apoyar el desarrollo del Proyecto ALGHA. Asimismo, agradecen el apoyo brindado por la *startup* Seallg, incubada en *Aquário de Ideias*—Incubadora de Empresas de Base Científica y Tecnológica del Vale do Ribeira (Brasil), la cual lideró el desarrollo conceptual de este proyecto basado en macroalgas. Finalmente, expresamos nuestro más profundo reconocimiento al equipo fundador del Proyecto ALGHA, cuya dedicación, creatividad y perseverancia fueron fundamentales a lo largo de esta trayectoria. Sus esfuerzos colectivos no solo hicieron posible la realización de este trabajo, sino que también reflejan un sólido compromiso con la innovación sostenible en biotecnología.

Fondos

Este estudio fue financiado por el *Green Light Accelerator Program 2024* (UTS Climate Change Cluster, Australia), el

cual proporcionó financiamiento semilla (AU\$10,000) para apoyar esta investigación; el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Nanotecnología para Agricultura Sostenible, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (INCTNanoAgro 405924/2022-4, becas de productividad tecnológica del CNPq [302711/2023-6 y 303653/2022-1], y MEC-CAPES [INCTNanoAgro 88887.953443/2024-00]); la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (2021/10639-5, 2022/02756-4, 2024/03203-4 y 2025/24947-4); becas FAPESP (2021/10639-5, 2022/02756-4, 2024/03203-4 y 2024/21456-7), beca de capacitación técnica (TT IVA) (2025/19448-9) y beca de periodismo científico (2025/24947-4); así como los proyectos CETMA y ECOhostel (008.00000373/2025-21).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autor

Conceptualización: JMCO, LJGE, TCS, JPCO, FSS (igual contribución); Curación de datos y Análisis formal: JMCO; Obtención de financiamiento: LJGE, JMCO, TCS, JPCO, FSS; Investigación: LJGE, JMCO, TCS; Metodología: JMCO, TCS, LJGE, JPCO, FSS; Administración del proyecto: LJGE, JMCO; Recursos: JMCO, TCS, LJGE (principal), GWB, LPM (apoyo); Supervisión: JMCO, LJGE; Validación: JMCO, LJGE, TCS, MVRS; Visualización: JMCO; Redacción del borrador original: JMCO; Redacción, revisión y edición: JMCO, TCS, MVRS, GWB, LPM.

Disponibilidad de datos

Se pueden obtener los datos para este estudio a través del autor de correspondencia bajo petición razonable.

Uso de herramientas de inteligencia artificial (IA)

Los autores, responsables de este trabajo, utilizaron herramientas de IA para la revisión gramatical del manuscrito.

REFERENCIAS

- Abdel-Latif HM, Dawood MA, Alagawany M, Faggio C, Nowosad J, Kucharczyk D. 2022. Health benefits and potential applications of fucoxanthin (FCD) extracted from brown seaweeds in aquaculture: An updated review. *Fish Shellfish Immunol.* 122:115-130. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.01.039>
- Admassu H, Gasmalla MAA, Yang R, Zhao W. 2018. Bioactive peptides derived from seaweed protein and their health benefits: antihypertensive, antioxidant, and antidiabetic properties. *J Food Sci.* 83(1):6-16. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14011>
- Agyarko KA. 2017. Assessing the socio-economic benefits of seaweed production to the rural coastal areas in Ghana. *Int J Adv Sci Eng Technol.* 5(3):32-36.

- Akköz C, Arslan D, Ünver A, Özcan MM, Yilmaz B. 2011. Chemical composition, total phenolic and mineral contents of *Enteromorpha intestinalis* (L.) Kütz. and *Cladophora glomerata* (L.) Kütz. seaweeds. *J Food Biochem.* 35(2):513-523. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2010.00399.x>
- Alghazeer R, El Fatah H, Azwai S, Elghmasi S, Sidati M, El Fituri A, Althaluti E, Gammoundi F, Yudiati E, Talouz N, et al. 2022. Nutritional and antinutritional content of underexploited edible seaweeds. *Aquac Nutr.* 2022(1):8422414. <https://doi.org/10.1155/2022/8422414>
- Ali MQ, Azhar MA, Munaim MSA, Ruslan NF, Ahmad N, Noman AE. 2025. Recent advances in edible seaweeds: ingredients of functional food products, potential applications, and food safety challenges. *Food Bioprocess Technol.* 18:1-28. <https://doi.org/10.1007/s11947-025-03758-0>
- Alloyarova YV, Kolotova DS, Derkach SR. 2024. Nutritional and therapeutic potential of functional components of brown seaweed: A review. *Foods Raw Mater.* 12(2):616. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-616>
- Barot M, Nirmal Kumar JI, Kumar RN. 2019. An evaluation of the nutritional composition of seaweeds as potential source of food and feed. *Natl Acad Sci Lett.* 42(6):459-464. <https://doi.org/10.1007/s40009-019-0783-x>
- Beacham TA, Cole IS, DeDroBeacham TA, Cole IS, DeDross LS, Raikova S, Chuck CJ, Macdonald J, Herrera L, Ali T, et al. 2019. Analysis of seaweeds from South West England as a biorefinery feedstock. *Appl Sci.* 9(20):4456. <https://doi.org/10.3390/app9204456>
- Behera DP, Vadodariya V, Veeragurunathan V, Sigamani S, Moovendhan M, Srinivasan R, Ingle KN. 2022. Seaweeds cultivation methods and their role in climate mitigation and environmental cleanup. *Total Environ Res Themes.* 3:100016. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2022.100016>
- Biancacci C, Visch W, Callahan DL, Farrington G, Francis DS, Lamb P, Bellgrove A. 2022. Optimisation of at-sea culture and harvest conditions for cultivated *Macrocystis pyrifera*: yield, biofouling and biochemical composition of cultured biomass. *Front Mar Sci.* 9:951538. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.951538>
- Biris-Dorhoi ES, Michiu D, Pop CR, Rotar AM, Tofana M, Pop OL, Farcas AC. 2020. Macroalgae—a sustainable source of chemical compounds with biological activities. *Nutrients.* 12(10):3085. <https://doi.org/10.3390/nu12103085>
- Calvez J, Azzout-Marniche D, Tomé D. 2024. Protein quality, nutrition and health. *Front Nutr.* 11:1406618. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1406618>
- Camperio J, Suarez JA, Simonton J, Paresky E, Parodi J, Benetti DD. 2025. Valorizing organic waste through black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*): a sustainable solution for aquafeeds with key nutrients and natural bioactive polyphenols. *Sustainability.* 17(5):1788. <https://doi.org/10.3390/su17051788>
- Celekli A, Bulut H. 2020. Biochemical and morphological responses to cadmium-induced oxidative stress in *Cladophora glomerata*. *Turk J Bot.* 44(3):222-231. <https://doi.org/10.3906/bot-2001-12>
- Černá M. 2011. Seaweed proteins and amino acids as nutraceuticals. *Adv Food Nutr Res.* 64:297-312. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387669-0.00024-7>
- Charoensiddhi S, Franco C, Su P, Zhang W. 2015. Improved antioxidant activities of brown seaweed *Ecklonia radiata* extracts prepared by microwave-assisted enzymatic extraction. *J Appl Phycol.* 27:2049-2058. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0476-2>
- Coudray C, Durand E, Balas L, Sultan A, Casas F, Feillet-Coudray C. 2021. Potential favourable health effects of some dietary uncommon fatty acids. *OCL.* 28:41. <https://doi.org/10.1051/ocl/2021028>
- Dos Santos TC, Obando JMC, Leite PEC, Pereira MR, de Freitas Leitão M, Abujadi C, Cavalcanti DN. 2024. Approaches of marine compounds and relevant immune mediators in Autism Spectrum Disorder: Opportunities and challenges. *Eur J Med Chem.* 266:116153. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2024.116153>
- Dos Santos TC, Obando JMC, Martins RCC, Alves MA, Villaza RC, Machado LP, Gasparoto MCG, Cavalcanti DN. 2024. Chemical Profile by CLUE-EMAR and Antifungal and Antioxidant Activity of the Marine Macroalgae *Dictyota menstrualis*. *Rev Virtual Quim.* 16(1):30-41. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20230044>
- Duarte CM, Wu J, Xiao X, Bruhn A, Krause-Jensen D. 2017. Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?. *Front Mar Sci.* 4:100. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>
- El-Beltagi HS, Mohamed AA, Mohamed HI, Ramadan KM, Barqawi AA, Mansour AT. 2022. Phytochemical and potential properties of seaweeds and their recent applications: A review. *Mar Drugs.* 20(6):342. <https://doi.org/10.3390/md20060342>
- Fan H, Xia S, Xiang J, Li Y, Ross MO, Lim SA, Yang F, Tu J, Xie L, Dougherty U, et al. 2023. Trans-vaccenic acid reprograms CD8+ T cells and anti-tumour immunity. *Nature.* 623:1034-1043. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06749-3>
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations, [WHO] World Health Organization. 2022a. Safety and quality of water used in food production and processing: Meeting the requirements of the food hygiene standards. Rome (Italy): FAO.
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations, [WHO] World Health Organization. 2022b. Report of the expert meeting on food safety for seaweed: current status and future perspectives. Rome, 28-29 October 2021. Rome (Italy): FAO. Food Safety and Quality Series, no. 13. 60 p. <https://doi.org/10.4060/cc0846en>
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2024. The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action. Rome (Italy): FAO. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2025. Guidelines for sustainable aquaculture. Rome (Italy): FAO. <https://doi.org/10.4060/cd3785en>
- Gambardella J, Khondkar W, Morelli MB, Wang X, Santulli G, Trimarco V. 2020. Arginine and endothelial function. *Biomedicines.* 8(8):277. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8080277>
- Ghirri A, Bignetti E. 2012. Occurrence and role of umami molecules in foods. *Int J Food Sci Nutr.* 63(7):871-881. <https://doi.org/10.3109/09637486.2012.676028>
- Glencross BD. 2020. A feed is still only as good as its ingredients: An update on the nutritional research strategies for the optimal evaluation of ingredients for aquaculture feeds. *Aquac Nutr.* 26(6):1871-1883. <https://doi.org/10.1111/anu.13138>
- Hayakawa YI, Ogawa T, Yoshikawa S, Ohki K, Kamiya M. 2012. Genetic and ecophysiological diversity of *Cladophora* (Cladophorales, Ulvophyceae) in various salinity regimes. *Phycol Res.* 60(2):86-97. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1835.2012.00641.x>
- Holdt SL, Kraan S. 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *J Appl Phycol.* 23:543-597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- Hrstich-Manning G, Aguirre JD. 2025. Nutritional composition of common, coastal seaweeds from northeastern New Zealand. N

- Z J Mar Freshwater Res. 59(3):485-500.
<https://doi.org/10.1080/00288330.2024.2353211>
- Jacobsen C, Sørensen ADM, Holdt SL, Akoh CC, Hermund DB. 2019. Source, extraction, characterization, and applications of novel antioxidants from seaweed. *Annu Rev Food Sci Technol.* 10(1):541-568.
<https://doi.org/10.1146/annurev-food-032818-121401>
- Jeeva S, Marimuthu J, Domettila C, Anantham B, Mahesh M. 2012. Preliminary phytochemical studies on some selected seaweeds from Gulf of Mannar, India. *Asian Pac J Trop Biomed.* 2(1):S30-S33.
[https://doi.org/10.1016/S2221-1691\(12\)60125-7](https://doi.org/10.1016/S2221-1691(12)60125-7)
- Jung DY, Son CW, Kim SK, Kim YJ, Chung CH, Lee JW. 2009. Biosorption of metal ions by seaweed alginate, polyguluronate, and polymannuronate. *J Life Sci.* 19(5):553-560.
<https://doi.org/10.5352/JLS.2009.19.5.553>
- Kim KY, Kim KY. 2024. Harnessing seaweed farming for climate mitigation in South Korea: evaluating carbon dioxide removal potential and future research directions. *Algae.* 39(4):329-347.
<https://doi.org/10.4490/algae.2024.39.10.28>
- Koroma J, Bundu AT, Alhassan A. 2025. Aquaculture as crucial promoter for sustainable global nutrition and food security. *J Sci Rep.* 9:229-250.
<https://doi.org/10.58970/jsr.1106>
- Krinsky NI. 2001. Carotenoids as antioxidants. *Nutrition.* 17(10):815-817.
[https://doi.org/10.1016/s0899-9007\(01\)00651-7](https://doi.org/10.1016/s0899-9007(01)00651-7)
- Laib E, Leghouchi E. 2012. Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn concentrations in *Ulva lactuca*, *Codium fragile*, *Jania rubens*, and *Dictyota dichotoma* from Rabta Bay, Jijel (Algeria). *Environ Monit Assess.* 184:1711-1718.
<https://doi.org/10.1007/s10661-011-2072-0>
- Lawton RJ, Cole AJ, Roberts DA, Paul NA, de Nys R. 2017. The industrial ecology of freshwater macroalgae for biomass applications. *Algal Res.* 24:486-491.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.019>
- López-Miranda J, Pérez-Martínez P, Pérez-Jiménez F. 2006. Health Benefits of Monounsaturated Fatty Acids. 1st. Reading (UK): Woodhead Publishing. p. 71-106.
<https://doi.org/10.1533/9781845691073.1.71>
- Lorbeer AJ, Charoensiddhi S, Lahnstein J, Lars C, Franco CM, Bulone V, Zhang W. 2017. Sequential extraction and characterization of fucoidans and alginates from *Ecklonia radiata*, *Macrocystis pyrifera*, *Durvillaea potatorum*, and *Seirococcus axillaris*. *J Appl Phycol.* 29:1515-1526.
<https://doi.org/10.1007/s10811-016-0990-5>
- Løvdal T, Lunestad BT, Myrmed M, Rosnes JT, Skipnes D. 2021. Microbiological food safety of seaweeds. *Foods.* 10:2719.
<https://doi.org/10.3390/foods10112719>
- Lytou AE, Schoina E, Liu Y, Michalek K, Stanley MS, Panagou EZ, Nychas GJE. 2021. Quality and safety assessment of edible seaweeds *Alaria esculenta* and *Saccharina latissima* cultivated in Scotland. *Foods.* 10(9):2210.
<https://doi.org/10.3390/foods10092210>
- Mæhre HK, Malde MK, Eilertsen K-E, Elvevoll EO. 2014. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed. *J Sci Food Agric.* 94(15):3281-3290.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.6681>
- Manivannan K, Thirumaran G, Devi GK, Anantharaman P, Balasubramanian T. 2009. Proximate composition of different group of seaweeds from Vedalai Coastal waters (Gulf of Mannar): Southeast Coast of India. *Middle East J Sci.* 4(2):72-77.
- Marques F, Lopes D, da Costa E, Conde T, Rego A, Ribeiro AI, Domingues MR. 2021. Seaweed blends as a valuable source of polyunsaturated and healthy fats for nutritional and food applications. *Mar Drugs.* 19(12):684.
<https://doi.org/10.3390/md19120684>
- Maulana MA, Rosariawari F. 2024. Optimization of seaweed cultivation as a natural barrier to reduce ocean acidification. *J Sci Technol.* 3(1):68-75.
<https://doi.org/10.55123/insologi.v3i1.3072>
- Meléndez-Martínez AJ. 2019. An overview of carotenoids, apocarotenoids, and vitamin A in agro-food, nutrition, health, and disease. *Mol Nutr Food Res.* 63(15):1801045.
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201801045>
- Messyasz B, Leska B, Fabrowska J, Pikosz M, Roj E, Cieslak A, Schroeder G. 2015. Biomass of freshwater *Cladophora* as a raw material for agriculture and the cosmetic industry. *Open Chemistry.* 13(1):000010151520150124.
<https://doi.org/10.1515/chem-2015-0124>
- Michalak I, Chojnacka K, Dobrzański Z, Górecki H, Zielińska A, Korczyński M, Opaliński S. 2011. Effect of macroalgae enriched with microelements on egg quality parameters and mineral content of eggs, eggshell, blood, feathers and droppings. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 95(3):374-387.
<https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2010.01065.x>
- Michalak I, Lewandowska S, Detyna J, Olsztyńska-Janus S, Bujak H, Pacholska P. 2018. The effect of macroalgal extracts and near infrared radiation on germination of soybean seedlings: preliminary research results. *Open Chem.* 16:1066-1076.
<https://doi.org/10.1515/chem-2018-0115>
- Michalak I, Messyasz B. 2021. Concise review of *Cladophora* spp.: macroalgae of commercial interest. *J Appl Phycol.* 33(1):133-166.
<https://doi.org/10.1007/s10811-020-02211-3>
- Mišurcová L, Ambrožová J, Samek D. 2011. Seaweed lipids as nutraceuticals. *Adv Food Nutr Res.* 64:339-355.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387669-0.00027-2>
- Mouritsen OG, Duelund L, Petersen MA, Hartmann AL, Frøst MB. 2019. Umami taste, free amino acid composition, and volatile compounds of brown seaweeds. *J Appl Phycol.* 31:1213-1232.
<https://doi.org/10.1007/s10811-018-1632-x>
- Munir M, Qureshi R, Bibi M, Khan AM. 2019. Pharmaceutical aptitude of *Cladophora*: a comprehensive review. *Algal Res.* 39:101476.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101476>
- Nepper-Davidsen J, Glasson CR, Lawton RJ, Magnusson M. 2023. High spatial and temporal variation in biomass composition of the novel aquaculture target *Ecklonia radiata*. *J Appl Phycol.* 35(4):1755-1768.
<https://doi.org/10.1007/s10811-023-02969-2>
- Neto R, Marçal C, Queirós A, Abreu H, Silva A, Cardoso S. 2018. Screening of *Ulva rigida*, *Gracilaria* sp., *Fucus vesiculosus* and *Saccharina latissima* as functional ingredients. *Int J Mol Sci.* 19(10):2987.
<https://doi.org/10.3390/ijms19102987>
- Ngoepe TK, Okpeku M, Mbokane EM, Madibana MJ, Maulu S, Mphalo SJ, Ndlela SZ. 2024. Potential of *Ecklonia maxima* as a feed supplement in aquafeed: a review. *Cogent Food Agric.* 10(1):2435586.
<https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2435586>
- Nutautaitė M, Vilienė V, Racevičiūtė-Stupelienė A, Bliznikas S, Karosienė J, Koreivienė J. 2021. Freshwater *Cladophora glomerata* biomass as promising protein and other essential nutrients source for high quality and more sustainable feed production. *Agriculture.* 11(7):582.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11070582>
- Pai SK, Chakraborty K, Chakraborty RD. 2025. Nutritional potential of Ulvophyceae green seaweeds: future superfoods. *J Food Meas Charact.* 19:1-14.
<https://doi.org/10.1007/s11694-025-03326-2>
- Patel A, Desai SS, Mane VK, Enman J, Rova U, Christakopoulos P, Matsakas L. 2022. Futuristic food fortification with a balanced ratio of dietary ω -3/ ω -6 omega fatty acids for the prevention of

- lifestyle diseases. *Trends Food Sci Technol.* 120(3):140-153. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.006>
- Pikosz M, Czerwik-Marcinkowska J, Messyasz B. 2019. The effect of *Cladophora glomerata* exudates on the amino acid composition of *Cladophora fracta* and *Rhizoclonium* sp. *Open Chem.* 17(1):313-324. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0032>
- Praeger C, Magnusson M, Lawton R. 2022. Optimising the zoospore release, germination, development of gametophytes and formation of sporophytes of *Ecklonia radiata*. *J Appl Phycol.* 34(5):2535-2549. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02806-y>
- Qu WJ, Liu T, Chai Y, Ji D, Che YX, Hu JP, Shi B. 2023. Efficient detection of L-aspartic acid and L-glutamic acid by self-assembled fluorescent microparticles with AIE and FRET activities. *Org Biomol Chem.* 21(19):4022-4027. <https://doi.org/10.1039/D2OB02297D>
- Racine P, Marley A, Froehlich HE, Gaines SD, Ladner I, MacAdam-Somer I, Bradley D. 2021. A case for seaweed aquaculture inclusion in US nutrient pollution management. *Mar Policy.* 129:104506. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104506>
- Rani G. 2007. Changes in protein profile and amino acids in *Cladophora vagabunda* (Chlorophyceae) in response to salinity stress. *J Appl Phycol* 19:803-807. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9211-6>
- Rybak A, Messyasz B, Łęska B. 2012. Bioaccumulation of alkaline soil metals (Ca, Mg) and heavy metals (Cd, Ni, Pb) patterns expressed by freshwater species of *Ulva* (Wielkopolska, Poland). *Int Rev Hydrobiol.* 97(6):542-555. <https://doi.org/10.1002/iroh.201201452>
- Sarkar MSI, Kamal M, Hasan MM, Hossain MI. 2016. Present status of naturally occurring seaweed flora and their utilization in Bangladesh. *Res Agric Livest Fish.* 3(1):203-216. <https://doi.org/10.3329/ralf.v3i1.27879>
- Schiener P, Black KD, Stanley MS, Green DH. 2015. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *J Appl Phycol.* 27:363-373. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0327-1>
- Schmid M, Guihéneuf F, Stengel DB. 2014. Fatty acid contents and profiles of 16 macroalgae collected from the Irish Coast at two seasons. *J Appl Phycol.* 26:451-463. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0132-2>
- Shrestha S, Johnston MR, Zhang W, Smid SD. 2021. A phlorotannin isolated from *Ecklonia radiata*, Dibenzodioxin-fucodiphloroethol, inhibits neurotoxicity and aggregation of β -amyloid. *Phytomed Plus.* 1(4):100125. <https://doi.org/10.1016/j.phyflu.2021.100125>
- Souto MM, Martins GEG, dos Santos SHDA, Latini JTP, de Almeida KCL. 2022. Effects of docosahexaenoic acid and eicosapentaenoic acid ingestion on the central nervous system of healthy individuals or those with neuropsychiatric pathologies in different age groups: a systematic review. *Rev Assoc Bras Nutr.* 13(1):1-21. <https://doi.org/10.47320/rasbran.2022.2652>
- Špoljarić Maronić D, Žuna Pfeiffer T, Stević F, Bek N. 2021. Selenium in algae: bioaccumulation and toxicity. In: Gupta DK, Palma JM (eds.), *Plant Growth and Stress Physiology*. Cham (Switzerland): Springer Nature. p. 261-281. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78420-1_12
- Srimaroeng C, Ontawong A, Saowakon N, Vivithanaporn P, Pongchaidecha A, Amornlerdpison D, Chatsudthipong V. 2015. Antidiabetic and renoprotective effects of *Cladophora glomerata* Kützting extract in experimental type 2 diabetic rats: a potential nutraceutical product for diabetic nephropathy. *J Diabetes Res.* 2015:320167. <https://doi.org/10.1155/2015/320167>
- Steinberg PD, Kendrick GA. 1999. Kelp Forests. In: Andrew N (ed.), *Under Southern Seas—The ecology of Australia's rocky reefs*. Sydney (Australia): University of New South Wales Press. p. 60-71.
- Steven AH, Mobsby D, Curtotti R. 2020. Australian Fisheries and Aquaculture Statistics 2018. Canberra (Australia): Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences (ABARES). Technical Report, No. 2019-093. 78 p.
- Stone DA, Bansemmer MS, Salini MJ. 2022. Dietary lipid and protein levels influence the growth and feed utilisation of large yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) at summer water temperatures. *Aquaculture.* 560:738567. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738567>
- Sultana F, Wahab MA, Nahiduzzaman M, Mohiuddin M, Iqbal MZ, Shakil A, Asaduzzaman M. 2023. Seaweed farming for food and nutritional security, climate change mitigation and adaptation, and women empowerment: a review. *Aquac Fish.* 8:463-480. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.001>
- Taylor MD. 2023. Metal concentrations in the edible claw and body muscle of a popular recreational crab species (*Scylla serrata*). *Mar Pollut Bull.* 197:115703. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115703>
- Theuerkauf SJ, Morris JA Jr, Waters TJ, Wickliffe LC, Alleway HK, Jones RC. 2019. A global spatial analysis reveals where marine aquaculture can benefit nature and people. *PLoS One.* 14(10):e0222282. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222282>
- Thiviya P, Gamage A, Gama-Arachchige NS, Merah O, Madhujith T. 2022. Seaweeds as a source of functional proteins. *Phycology.* 2:216-243. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2020012>
- Thuy TTT, Ly BM, Van TTT, Van Quang N, Tu HC, Zheng Y, Ai U. 2015. Anti-HIV activity of fucoidans from three brown seaweed species. *Carbohydr Polym.* 115:122-128. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.068>
- Van Oort PAJ, Verhagen A, van der Werf AK. 2023. Can seaweeds feed the world? Modelling world offshore seaweed production potential. *Ecol Model.* 484:110486. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110486>
- Vijayaram S, Ringø E, Ghafarifarsani H, Hoseinifar SH, Ahani S, Chou CC. 2024. Use of algae in aquaculture: a review. *Fishes.* 9(2):63. <https://doi.org/10.3390/fishes9020063>
- Visch W, Layton C, Hurd CL, Macleod C, Wright JT. 2023. A strategic review and research roadmap for offshore seaweed aquaculture—A case study from southern Australia. *Rev Aquac.* 15(4):1467-1479. <https://doi.org/10.1111/raq.12788>
- Wan AH, Davies SJ, Soler-Vila A, Fitzgerald R, Johnson MP. 2019. Macroalgae as a sustainable aquafeed ingredient. *Rev Aquac.* 11(3):458-492. <https://doi.org/10.1111/raq.12241>
- Wang X, Zhang C, Bao N. 2023. Molecular mechanism of palmitic acid and its derivatives in tumor progression. *Front Oncol.* 13:1224125. <https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1224125>
- Wernberg T, Coleman MA, Babcock RC, Bell SY, Bolton JJ, Connell SD, Hurd CL, Johnson CR, Marzinelli EM, Shears NT, et al. 2019. Biology and ecology of the globally significant kelp *Ecklonia radiata*. *Oceanogr Mar Biol.* 57:265-324. <https://doi.org/10.1201/9780429026379>
- Wu G, Zhuang D, Chew KW, Ling TC, Khoo KS, Van Quyen D, Feng S, Show PL. 2022. Current status and future trends in removal, control, and mitigation of algae food safety risks for human consumption. *Molecules.* 27(19):6633. <https://doi.org/10.3390/molecules27196633>
- Wunderle C, Haller L, Laager R, Bernasconi L, Neyer P, Stumpf F, Schuetz P. 2024. The association of the essential amino acids

- lysine, methionine, and threonine with clinical outcomes in patients at nutritional risk: Secondary analysis of a randomized clinical trial. *Nutrients*. 16(16):2608.
<https://doi.org/10.3390/nu16162608>
- Yazılan Çamlık Ö, Taşkın E. 2024. Accumulation of heavy metals in *Cladophora fracta* and *Chaetomorpha ligustica* species. *MedFAR*. 7(2):70-78.
<https://doi.org/10.63039/medfar.1478935>
- Yong WTL, Thien VY, Rupert R, Rodrigues KF. 2022. Seaweed: a potential climate change solution. *Renew Sustain Energy Rev*. 159:112222.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112222>
- Załęski A, Banaszkiewicz A, Walkowiak J. 2013. Butyric acid in irritable bowel syndrome. *Gastroenterol Rev*. 8(6):350-353.
<https://doi.org/10.5114/pg.2013.39917>
- Zhang J, Wang YX, Kang F, Shao YY, Li ZJ, Yang XL. 2008. Synthesis of novel fullerene α -amino acid conjugates. *Chin Chem Lett*. 19(10):1159-1162.
<https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2008.06.035>