

Microalgas Marinas: Una Fuente Valiosa de Polisacáridos con Propiedades Bioactivas y Funcionales

Marine Microalgae: A Source of Polysaccharides with Bioactive and Functional Properties

Miranda-Arizmendi Valeria¹, Fimbres-Olivarria Diana², Miranda-Baeza Anselmo³, Rascón-Chu Agustín¹, Martínez-Robinson Karla¹, Lizardi-Mendoza Jaime¹, Campa-Mada Alma¹, Carvajal-Millan Elizabeth^{1*}

1 Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD, AC), Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, Hermosillo, Sonora, México, CP 83304.

2 Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS), Universidad de Sonora, Blvd. Luis Donaldo Colosio, S/N, Hermosillo, Sonora, México, CP 83000.

3 Laboratorio de Tecnologías de Cultivo de Organismos Acuáticos, Universidad Estatal de Sonora, Blvd. Manlio Fabio Beltrones No. 810, Col. Bugambilias, Navojoa, Sonora, México, CP 85875.

Autor para la correspondencia: Carvajal-Millan Elizabeth, e-mail: ecarvajal@ciad.mx

Resumen

La información presentada en este artículo de divulgación científica muestra cómo diversas algas marinas producen distintos compuestos bioactivos, entre ellos los polisacáridos, los cuales tienen propiedades bioactivas (antitumorales, anticoagulantes y antivirales, entre otras) y funcionales (texturizantes, gelificantes y adhesivas, entre otras). La parte central de esta contribución se enfoca en informar acerca de la importancia de las microalgas marinas como una fuente valiosa de polisacáridos que han generado gran interés por su alto potencial de aplicación. Cabe resaltar que, a pesar de su reconocida relevancia, las microalgas marinas han sido prácticamente inexploradas en relación con las macroalgas marinas. Este artículo describe de una forma resumida y clara las características, las propiedades bioactivas y funcionales y el potencial de aplicación de los polisacáridos de las microalgas marinas.

Palabras clave: microalgas marinas, ficocoloides, salud, industria.

Abstract

The information presented in this article shows how various marine algae produce different bioactive compounds, including polysaccharides, which have bioactive (antitumor, anticoagulant, and antiviral, among others) and functional (texturizing, gelling, and adhesive, among others) properties. The central part of this contribution focuses on informing about the importance of marine microalgae as a valuable source of polysaccharides that have generated significant interest due to their high application potential. It should be noted that, despite its recognized relevance, marine microalgae have been practically unexplored concerning marine macroalgae. This article describes in a summarized and clear way the characteristics, bioactive and functional properties, and application potential of polysaccharides from marine microalgae.

Key words: marine microalgae, phycocolloids, health, industry.

DOI: 10.46588/invurnus.v18i1.91

Recibido 26/03/2023

Aceptado 20/05/2023

Publicado 16/07/2023

Introducción

En los últimos años, los organismos marinos, incluidas las algas, se han destacado como fuentes potenciales de metabolitos y compuestos con actividad biológica, debido a que han demostrado diversas actividades biológicas con efectos positivos en la fisiología humana, así como numerosas propiedades tecno funcionales. Durante mucho tiempo, en países asiáticos, las algas marinas se han utilizado como fuente de alimento, con fines medicinales y como suplementos. Son consideradas una fuente importante de aditivos y el valor comercial de los mismos depende de su aplicación en las industrias alimenticias y farmacéuticas (Tanna y Mishra, 2019).

Las algas también se consideran una fuente valiosa de polisacáridos con propiedades bioactivas y funcionales (Wijesekara y col. 2011). En particular, se ha reportado que los polisacáridos sulfatados de algas marinas presentan actividad antitumoral, anticoagulante y antiviral, entre otras, las cuales podrían estar relacionados con sus componentes químicos y su estructura (Khan y col., 2019). Estos compuestos pueden ser también excelentes moléculas funcionales debido a sus propiedades texturizantes, gelificantes y adhesivas, entre otras (Tanna y Mishra, 2019).

Los polisacáridos son macromoléculas necesarias para el crecimiento y el desarrollo de múltiples organismos (Yi y col., 2020). El contenido de polisacáridos (conocidos también como ficocoloides) en distintas especies de algas, oscila entre el 4 y el 76% de su peso seco (Kraan, 2012). Los ficocoloides son polisacáridos asociados a la pared celular y a los espacios intercelulares de las algas marinas; son ingredientes valiosos utilizados ampliamente en preparaciones industriales (FAO, 2012). Las carrageninas y el agar son los principales polisacáridos de algas empleados en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, papelería y textil, donde se utilizan como agentes espesantes, estabilizadores, emulsionantes y gelificantes (Glicksman, 1987).

Existen diversos estudios sobre la obtención y aprovechamiento de polisacáridos presentes en las macroalgas marinas. Sin embargo, hay poca información de estos compuestos en microalgas. Para comprender mejor las diferentes aplicaciones potenciales de los polisacáridos se debe tomar en cuenta su estructura, características fisicoquímicas y propiedades viscoelásticas, ya que estos parámetros determinan sus propiedades bioactivas y funcionales (Miranda-Arizmendi y col., 2022; Geresh y col., 2002). En este sentido, la relación estructura-función en polisacáridos de fuentes escasamente exploradas como las microalgas es poco conocida y puede representar el punto de partida en el desarrollo de nuevos biomateriales.

Este artículo describe la importancia de las microalgas marinas como una fuente valiosa de polisacáridos con propiedades bioactivas y gran potencial de aplicación en distintas áreas como la medicina, la farmacéutica y la alimentación. Se enfatiza también el hecho de que, en microalgas marinas, este aspecto ha sido poco explorado en relación con las macroalgas marinas.

Compuestos de Origen Marino

El incremento en la demanda de sustancias novedosas para el tratamiento de enfermedades como cáncer, infecciones microbianas y procesos inflamatorios ha motivado la exploración de compuestos bioactivos de las algas (Lordan y col., 2011). El descubrimiento de nuevos materiales con actividad biológica es un trabajo que requiere de múltiples disciplinas. Uno de los primeros pasos en esta tarea es lograr la identificación de un compuesto con potencial, o con características que puedan ser modificadas químicamente para incrementar su actividad, mejorar su metabolismo o perfil farmacocinético.



La búsqueda de nuevos productos naturales se ha enfocado principalmente a organismos terrestres como plantas y hongos. En bases de datos recientemente publicadas sobre compuestos producidos por plantas, bacterias y organismos marinos se enlistan aproximadamente 45,000 compuestos naturales, de los cuales la mayoría son de origen vegetal (Ntie-Kang y Svozil, 2020). No obstante, el océano se puede considerar como la fuente de recursos naturales más rica en el planeta, la cual ha sido poco explorada en comparación con las fuentes terrestres. Así, mientras que los océanos cubren más del 75% de la superficie terrestre, sólo el 7% ha sido explorado (Figura 1). Gracias a la gran diversidad de organismos que contiene y a las condiciones a las que se ven sometidos, que en ocasiones son extremas, se pueden extraer numerosas sustancias biológicamente activas y tecnológicamente funcionales (Hamed y col., 2015). Se han reportado múltiples compuestos marinos como péptidos aislados de peces y polisacáridos aislados de algas que presentan actividad anticancerígena, anticoagulante y antioxidante, entre otras, así como propiedad texturizante, hidratante y espumante, entre otras (Lordan y col., 2011) (Figura 1). De esta forma, los organismos marinos se consideran el mejor reservorio de compuestos bioactivos y funcionales.



Figura 1. El océano, la fuente de sustancias bioactivas y tecnológicamente funcionales más rica en el planeta.

Compuestos Bioactivos y Funcionales en Algas

Considerando la enorme extensión del océano, el conocimiento y la utilización de organismos como las algas marinas a un nivel industrial se encuentra apenas en las primeras etapas. Así, la generación de nuevo conocimiento sobre las algas puede dar lugar al desarrollo de una industria global basada en los materiales extraídos a partir de estos organismos (Beaumont y col., 2021).

Dentro de la gran variedad de vida marina, aproximadamente el 90% de las especies de flora marina son algas y estas son las responsables de alrededor del 50% de la fotosíntesis global (John, 1994). Según estadísticas reportadas por Brasil y col. (2017), anualmente se producen 7,000 toneladas de biomasa de algas secas en todo el mundo con un valor en el mercado entre 3.8 y 5.4 mil millones de dólares (Figura 2). Estos valores demuestran la popularidad que las algas están ganando en el mundo y el potencial de utilizarlas e incorporarlas en una amplia variedad de productos industriales.



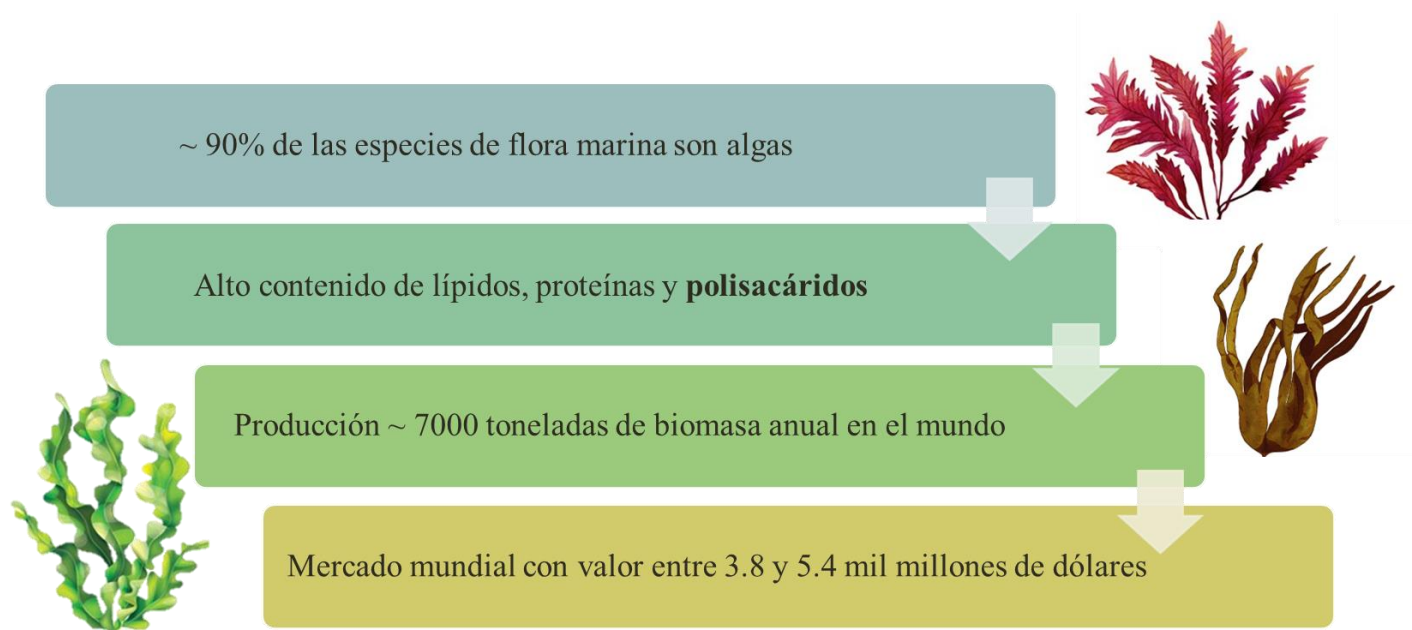


Figura 2. Principales compuestos en algas marinas y los niveles de producción a nivel global.

En relación con las macroalgas, las microalgas tienen ventajas que les permiten ser aprovechadas ampliamente, entre ellas destacan su rápida tasa de crecimiento, requisitos simples para su cultivo y la capacidad de sobrevivir bajo condiciones estresantes (Tang y col., 2020).

Varios estudios científicos han demostrado el gran potencial de las algas como materia prima y fuente de diversos recursos biológicos valiosos, los cuales incluyen inhibidores de enzimas, florotaninos, polisacáridos, lípidos, péptidos bioactivos, alcaloides, terpenoides halogenados y pigmentos (Rengasamy y col., 2020; Tang y col., 2020). Respecto a la aplicación de sus metabolitos, Rengasamy y col. (2020) compilaron estudios de los compuestos bioactivos aislados de algas marinas y su papel en el tratamiento de múltiples enfermedades como cáncer, diabetes, inflamación y demencia.

Polisacáridos de Algas Marinas

Los polisacáridos son bio-macromoléculas que consisten en largas cadenas formadas por unidades de monosacáridos. La gran variabilidad estructural que presentan se debe a la cantidad de azúcares simples disponibles (en su mayoría hexosas y pentosas), así como a las posibilidades de enlaces glucosídicos. La estructura de los polisacáridos depende tanto de su composición como del tipo de enlace, el cual determina la flexibilidad conformacional de la molécula (Prybylski y col., 2020). Por ejemplo, la complejidad de los glucanos se ve influenciada por la flexibilidad de la cadena, dada la naturaleza de los azúcares implicados. Además, se debe considerar si la molécula es un homopolisacárido o un heteropolisacárido y si contiene azúcares ácidos o neutros. También es necesario, en dicha complejidad, tener en cuenta el peso molecular, los grupos funcionales en la cadena y la presencia de otras moléculas unidas covalentemente, como las proteínas (Prybylski y col., 2020).



Las algas contienen principalmente polisacáridos de alto peso molecular. Estas macromoléculas, denominadas también ficocoloides, tienen numerosas funciones en las algas; son los principales componentes estructurales de sus paredes celulares y pueden estar involucrados en los mecanismos de reconocimiento entre las algas y los patógenos (Cardozo y col., 2007). Estos polisacáridos desempeñan funciones estructurales, aportan rigidez, acumulan mucílago en su pared celular y brindan protección ante desecación o condiciones de estrés (Pangestuti y Kim, 2014) (Figura 3). Además, debido a su capacidad para retener cantidades significativas de agua, se destaca su capacidad para formar geles y la quelación de metales. Los ficocoloides se utilizan para una gran variedad de aplicaciones comerciales en las áreas farmacéuticas, tecnología de alimentos, biotecnología, cosmética, ingeniería ambiental, etc. (Venugopal, 2008).

Funciones biológicas:

- ✓ Componentes estructurales
- ✓ Reconocimiento de patógenos
- ✓ Acumulación de mucílago
- ✓ Formación de geles
- ✓ Protección ante desecación



Figura 3. Función de los polisacáridos en algas marinas.

El tipo de polisacárido presente en las algas marinas varía según la fuente. Las algas cafés o pardas son ricas en alginatos, fucanos y laminarina, mientras que las algas rojas presentan galactanos, sulfatados, xilanos y almidón florideano (Kraan, 2012). Las algas verdes contienen almidón, xilanos, mananos y polisacáridos iónicos que contienen grupos sulfato (Zaporozhets y col., 2014). La variabilidad estructural de estas biomoléculas les confiere distintas funciones. Los polisacáridos de las microalgas se pueden clasificar en tres grupos principales: intracelulares, estructurales y extracelulares (Delattre y col., 2016). Estos polisacáridos desempeñan funciones de almacenamiento y estructurales, además de ser activadores biológicos, soportes de adhesión o reguladores del contenido de agua (Singh y Sáxea, 2015). Los monosacáridos básicos presentes en estos organismos son glucosa, galactosa, manosa, ramnosa, arabinosa, xilosa, ribosa y fucosa (Vuppaladiyam y col., 2018).

Polisacáridos de Macroalgas Marinas

Las macroalgas se pueden clasificar en tres grupos principales con base en el pigmento que presentan: Phaeophyceae (algas pardas), principalmente de color marrón debido a su contenido de fucoxantina; Chlorophyceae (algas verdes) dominada por pigmentos como la clorofila a y b, y xantofilas; y, por último, las Rhodophyceae (algas rojas) constituidas principalmente por ficocianina y ficoeritrina (O'Sullivan y col., 2010) (Tabla 1). Estos organismos contienen polisacáridos ricos en sulfato en sus paredes celulares (Raposo

y col., 2015). Las carrageninas son los principales polisacáridos sulfatados de macroalgas empleados en la industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, papelería y textil como agentes espesantes, estabilizadores, emulsionantes y gelificantes (Glicksman, 1987). Estos polisacáridos de alto peso molecular y sus productos de degradación de bajo peso molecular son económicamente importantes, debido a las numerosas propiedades funcionales. La mayor parte de las investigaciones sobre la capacidad gelificante de la carragenina se ha enfocado a iota y kappa carragenina. La gelificación de lambda carragenina con iones trivalentes fue reportada por Running y col. (2012) en la macroalga *Gigartina lanceata*. Este hallazgo permitió expandir el potencial de aplicación de la lambda carragenina más allá de un agente texturizante en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas. Otros polisacáridos importantes de las macroalgas marinas son los alginatos, agar, fucoidan, laminarina y ulvanos (Tseng, 2001; Rengasamy y col., 2014).

Tabla 1. Propiedades bioactivas y funcionales de polisacáridos extraídos de macroalgas.

| Grupo de macroalga | Polisacárido | Propiedad bioactiva | Referencia |
|---------------------------------|---------------------|---|-----------------------|
| Rhodophyceae (algas rojas) | Carragenina | Antioxidante, antiviral, antimicrobiana y anticancerígena | Jiang y col. (2021) |
| Phaeophyceae (algas pardas) | Fucoidan | Antioxidante, antineurodegenerativa y anticancerígena | Li y col. (2019) |
| Chlorophyceae (algas verdes) | Ulvan | Antioxidante, antiviral, anticoagulante y antimicrobiana | Cunha y Grenha (2016) |
| Grupo de macroalga | Polisacárido | Propiedad funcional | Referencia |
| Rhodophyceae (algas rojas) | Agar Carragenina | Espesante, estabilizante y gelificante | Glicksman (1987) |
| Phaeophyceae (algas pardas) | Alginato | Emulsificante, formador de películas, estabilizante | Torabi y col. (2021) |
| Chlorophyceae (algas verdes) | Ulvan | Gelificante, quelante, estabilizante | Lahaye y Robic (2007) |

Diversos estudios reportan que los polisacáridos sulfatados de algas presentan propiedades bioactivas y funcionales relacionadas con sus características estructurales (Geresh y col., 2002; Wijesekara y col., 2011). Por ejemplo, la carragenina presenta una actividad antioxidante más alta cuando el polisacárido registra menor peso molecular (Sun y col., 2010). También se ha reportado que los polisacáridos sulfatados de macroalgas presentan actividad anticancerígena por inducción de apoptosis en las células cancerosas (Khan y col., 2019), propiedad que se ha relacionado con la composición y estructura de la molécula.



Polisacáridos de Microalgas Marinas

El interés por las microalgas es cada vez mayor debido a los compuestos que producen y a las ventajas que presentan por el hecho de ser fáciles de cultivar y de que su cosecha no depende de algún clima o estación. La producción de polisacáridos, o cualquier otro compuesto, se puede realizar durante todo el año (Figura 4). Los polisacáridos y los exopolisacáridos en particular son producidos por múltiples especies de microalgas. Estos compuestos poseen diversas propiedades bioactivas y funcionales.

- Aprovechamiento integral
- Alta tasa de crecimiento
- Requisitos de cultivos simple
- Capacidad para sobrevivir bajo condiciones de estrés

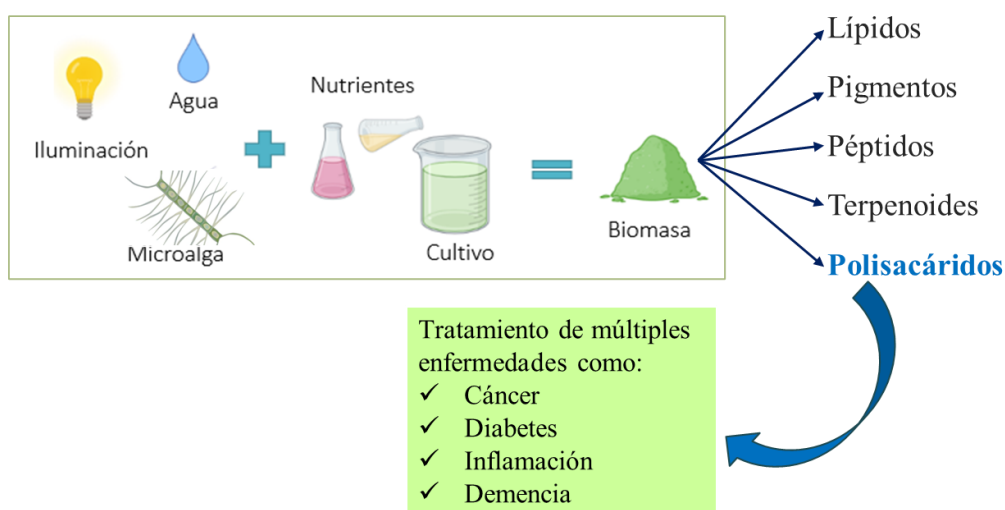


Figura 4. Las microalgas marinas como fuente de compuestos con propiedades bioactivas.

La información científica reportada sobre polisacáridos de microalgas marinas hace énfasis en cómo el peso molecular, el contenido de grupos sulfato y la carga negativa pueden ser responsables de sus múltiples propiedades. Los exopolisacáridos sulfatados sintetizados por distintas microalgas son heterogéneos y muy diferentes estructuralmente, lo que hace que su investigación sea desafiante. A diferencia de las macroalgas, las microalgas tienen la ventaja de poder ser cultivadas en condiciones controladas, lo que puede hacer que la composición química, la estructura y el comportamiento reológico de sus polisacáridos sea más estable, sin importar los periodos de recolección (Raposo y col., 2013). No obstante, a pesar de la reconocida importancia de estos organismos, la estructura de los polisacáridos de las microalgas ha sido prácticamente inexplorada, en contraste con la de las macroalgas. Sólo se han resuelto pocas estructuras de polisacáridos de microalgas debido a las dificultades encontradas en la extracción de muestras puras y a la complejidad de su estructura química. En la Tabla 2 se presentan algunos ejemplos de polisacáridos de microalgas con propiedades biológicas y funcionales de interés para el área de salud humana y el área de la industria alimentaria, cosmética y biotecnológica, principalmente. En esta tabla se hace evidente la falta de información acerca de las características químicas y estructurales de los polisacáridos de microalgas.

Tabla 2. Propiedades bioactivas y funcionales de polisacáridos extraídos de microalgas.

| Microalga | Polisacárido | Propiedad bioactiva | Referencia |
|---|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| <i>Conticribra weissflogii</i> | (1→3)-β-D-glucano | Immunomoduladora | Rizzi y col. (2023) |
| <i>Spirulina platensis</i> | PSPC | Antioxidante y antitumoral | Ai y col. (2023) |
| <i>Navicula inserta</i> | PSPC | Antioxidante y antihemolítica | Gonzales-Vega y col. (2022) |
| <i>Chaetoceros muelleri</i> | PSPC | Antioxidante | Miranda-Arizmendi y col. (2022) |
| <i>Navicula</i> sp. | PSPC | Antioxidante | Fimbres-Olivarria y col. (2018) |
| <i>Arthrospira platensis</i> | PPC | Antioxidante | Challouf y col. (2011) |
| <i>Synedra acus</i> | 1→3;1→6-β-D-glucano | Anticancerígena | Kusaikin y col. (2010) |
| <i>Gyrodinium impudicum</i> | PSPC | Antiviral | Yim y col. (2004) |
| <i>Chlorellastigmatophora Phaeodactylum tricornutum</i> | PSPC | Antiinflamatoria e inmunomoduladora | Guzmán y col. (2003) |
| Microalga | Polisacárido | Propiedad funcional | Referencia |
| <i>Chlorella pyrenoidosa</i> | PPC | Fibra dietaria | Guo y col. (2021) |
| <i>Spirulina platensis</i> | PSPC | Espumante y emulsificante | Ben Hlima y col. (2021) |
| <i>Porphyridium cruentum</i> | PSPC | Prebiótico | Barros de Medeiros y col. (2021) |
| <i>Arthrospira platensis</i> | PPC | Formador de películas | Morales-Jiménez (2020) |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | PPC | Aditivo alimentario | Levine y col. (2018) |
| <i>Nostoc</i> sp. | (1→3)-β-D-glucano | Gelificante | Fimbres-Olivarria y col. (2016) |
| <i>Porphyridium purpureum</i> | PSPC | Espesante | Jindal y col. (2013) |
| <i>Euglena gracilis</i> | PPC | Hidratante | Chen y col. (2010) |
| <i>Navicula</i> sp. | PPC | Texturizante | Tannin-Spitz y col. (2005) |

PPC= Polisacárido parcialmente caracterizado

PSPC= Polisacárido sulfatado parcialmente caracterizado

De los pocos estudios reportados sobre polisacáridos de microalgas, destacan los del polisacárido extracelular de la microalga roja *Porphyridium* sp., el polisacárido de la pared celular de *Chlorella* sp. y los polisacáridos de la teca de *Tetraselmis* sp. (Le Costaouëc y col., 2017) (Figura 5). Sin embargo, la información sobre este tipo de macromoléculas es limitada y para evaluar sus aplicaciones potenciales es



necesario conocer su estructura y características como, por ejemplo, el peso molecular y las propiedades viscoelásticas, las cuales pueden ser determinantes para definir su uso (Raposo y col., 2013).

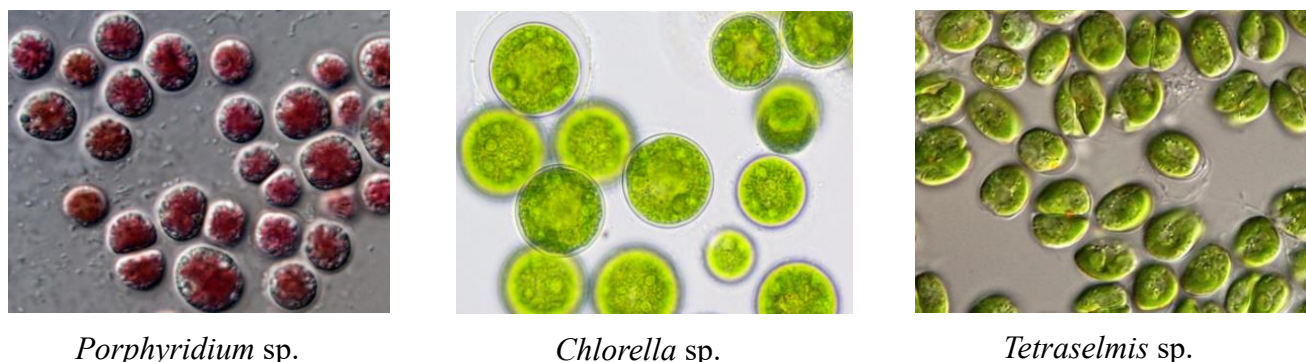


Figura 5. Microcraalgas marinas cuyos polisacáridos han sido más estudiados.

Se han reportado múltiples efectos benéficos de distintos polisacáridos de microalgas en la salud humana. Un ejemplo de ellos es la crisolaminarina de *Thalassiosira pseudonana*, estructuralmente compuesto por un esqueleto de β -glucosa en una proporción de 11:1 de (β -1,3)-glucosa y (β -1,6)-glucosa, respectivamente (Hildebrand y col., 2017), la cual inhibe la proliferación de células tumorales de colon.

Por otro lado, Fimbres-Olivarria y col. (2018) investigaron los polisacáridos sulfatados de la microalga *Navicula* sp. obteniendo un rendimiento de 4.4% (p/p) con un contenido de sulfato de 0.33% (p/p). En otro estudio, Fimbres-Olivarria y col. (2016) evaluaron la capacidad gelificante de los polisacáridos sulfatados extraídos de *Navicula* sp., y lograron obtener un gel con un mecanismo similar al de lambda carragenina, basado en la interacción con Fe (III). Así mismo, estos autores reportaron que los polisacáridos extraídos presentaron capacidad antioxidante, lo cual aumenta el potencial de aplicación de estas macromoléculas (Figura 6).

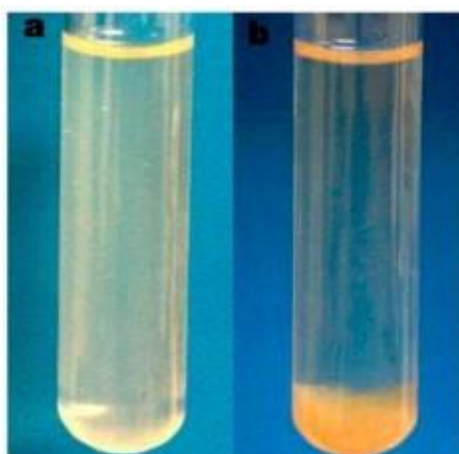


Figura 6. Polisacárido sulfatado de *Navicula* sp. antes (a) y después (b) de la adición de FeCl₃. Adaptado de Fimbres-Olivarria y col. (2016).

Polisacáridos de las Microalgas de Cristal: Las Diatomeas

Las diatomeas (Bacillariophytas) son microalgas con una pared celular que asemeja a una cápsula de cristal, debido a su composición de sílice. Son consideradas el grupo más diverso dentro del fitoplancton oceánico con un estimado de entre 10^5 y 10^7 especies. Además, son un grupo de suma importancia dado que contribuyen con aproximadamente el 40% de productividad primaria en los ecosistemas marinos y el 20% de la fijación de carbono global (Norton y col., 1996). Las diatomeas pertenecen a la división heterokontophyta y se dividen en dos grupos taxonómicos basados en la forma de la célula: las diatomeas centrales presentan una simetría radial y las diatomeas penadas presentan una simetría bilateral. Las diatomeas centrales son predominantemente planctónicas, mientras que las penadas pueden encontrarse adheridas a superficies o creciendo y trasladándose por el sedimento (Van den Hoek y col., 1995).

Estos organismos consisten en una célula con un protoplasto incrustado en una frústula, nombre que recibe la pared celular de las diatomeas. Esta estructura se encuentra entre dos valvas o tecas superpuestas, donde la epiteca (parte superior) es más grande que la hipoteca (parte inferior). La estructura de la frústula puede asemejar una varilla, un copo o una estructura tridimensional más compleja (Brzowska y col., 2020) (Figura 7). La frústula se compone de tres capas sucesivas: 1) la capa orgánica más interna, denominada diatopetum y que está en contacto con el plasmalema; 2) una capa mineral silificada que contiene materia orgánica; y 3) una capa orgánica externa que queda atrapada en el mucílago secretado, al cual se le denomina “exopolisacárido” y se encuentra unido a la pared celular. En diversas diatomeas se han investigado los polisacáridos de la pared celular, los de almacenamiento (alimento intracelular) y el mucílago producido. Dichos estudios han revelado que el contenido, composición y características de estos polisacáridos varía con las condiciones ambientales y las técnicas de extracción utilizadas (Underwood y Paterson, 2003; Gügi y col., 2015).

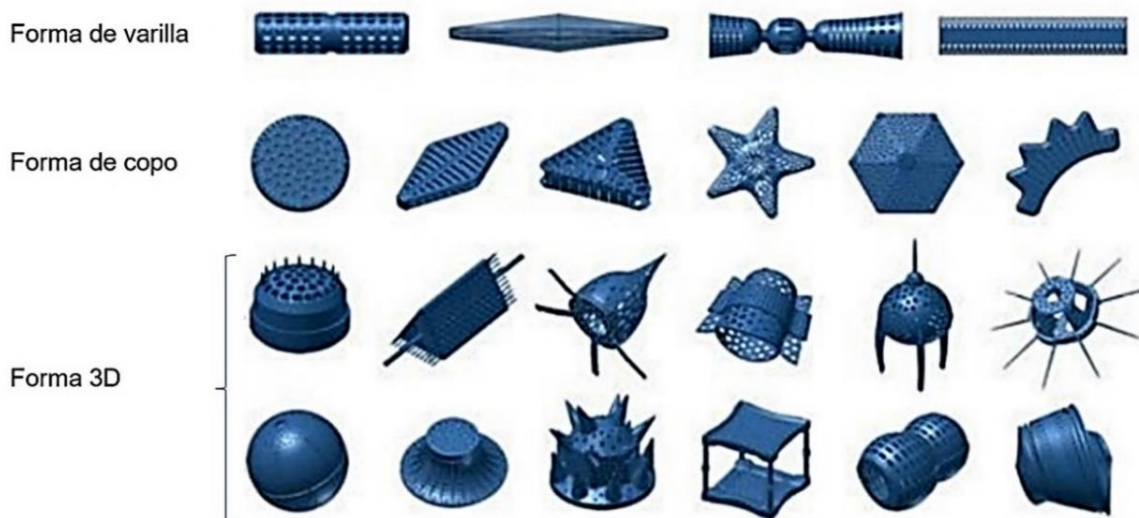


Figura 7. Estructura de la frústula de diatomeas. Adaptado de Brzowska y col. (2020).



Dependiendo de la movilidad de la diatomea (bentónica o planctónica) y de las condiciones ambientales, estos organismos producen diferentes cantidades de sustancias extracelulares poliméricas, siendo estas principalmente carbohidratos. Una de las razones por las cuales las diatomeas bentónicas dominan sobre otras algas es la capacidad de moverse gracias a que secretan una sustancia mucilaginosa que brinda unión al sustrato y les permite deslizarse a través de éste. Dicho movimiento es característico de las que presentan formas penadas con rafe y campos porosos apicales que permiten su asociación con el sustrato; sin embargo, algunas diatomeas céntricas también pueden secretar mucílago a partir de procesos valvares de una manera menos frecuente (Buendía-Flores et al., 2015). Los polisacáridos de diatomeas bentónicas se incorporan a la cadena alimentaria marina como fuente de materia orgánica para animales marinos tanto planctónicos como bentónicos (Decho, 1990; Shniukova y Zolotareva, 2015).

Los polisacáridos sulfatados se encuentran en la pared celular de estas microalgas. El mucílago extracelular que producen las diatomeas está conformado por un alto contenido de carbohidratos y tal matriz puede incluir otro tipo de biopolímeros. Debido a las miles de especies con las que cuenta el grupo de las diatomeas y a la gran variedad de formas y simetrías disponibles, tanto la composición de monosacáridos como la de sus glico-conjugados suele ser altamente específica. Los exopolisacáridos de estas microalgas se producen como resultado de la fijación fotosintética del carbón inorgánico (Decho, 1990). Estos polímeros realizan varias funciones, entre ellas se pueden encontrar formando envolturas de mucílago y coberturas que forman un microambiente alrededor de las células y las protege de cambios ambientales repentinos y adversos. La presencia de grupos carboxilo y sulfato en estos exopolisacáridos aseguran la desintoxicación causada por metales pesados y la inmovilización de sustancias tóxicas, además de evitar que las células se sequen durante marea baja. Los polisacáridos en diatomeas están relacionados principalmente con el almacenamiento intracelular, seguido por los encontrados en la matriz extracelular, denominados exopolisacáridos, y finalmente los asociados a la frústula o pared celular, principalmente polisacáridos sulfatados (Gügi y col., 2015). Los polisacáridos de estos organismos poseen alto valor agregado y un gran potencial de aplicación en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades bioactivas. Estas macromoléculas han sido evaluadas en distintas aplicaciones terapéuticas y se les han atribuido propiedades antioxidantes y anticancerígenas (Beaumont y col., 2021).

Conclusiones

El contenido y diversidad de compuestos bioactivos y funcionales en las algas marinas ha aumentado el interés por estos organismos. En particular, los polisacáridos de microalgas marinas presentan una gran variedad de funciones y posibles aplicaciones en el área de la medicina, la farmacéutica y la alimentación, entre otras. Sin embargo, son necesarios estudios adicionales enfocados a la extracción, caracterización y evaluación del potencial de aplicación de estas macromoléculas. La generación de nuevo conocimiento en estas áreas es esencial para el desarrollo de estrategias efectivas en el uso de las microalgas marinas de las cuales todavía hay una gran parte sin explorar. Las perspectivas de aplicación biotecnológica de los polisacáridos sulfatados recuperados de las microalgas son prometedoras. No obstante, para lograr utilizar estos biopolímeros a nivel industrial es necesaria su extracción a mayor escala a partir de una alta producción de biomasa de microalgas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento al proyecto No. 319684 “Estudio de las características macromoleculares y las propiedades gelificantes y bioactivas de los polisacáridos sulfatados de algas



marinas” (responsable: Dra. Elizabeth Carvajal Millán). Este proyecto fue aprobado por CONAHCYT en la Convocatoria de Ciencia Básica y/o Ciencia de Frontera Modalidad: Paradigmas y Controversias de la Ciencia 2022.

Referencias

1. Ai X, Yu P, Li X, Lai X, Yang m, Liu F, Luan F, Meng X. 2023. Polysaccharides from *Spirulina platensis*: Extraction methods, structural features and bioactivities diversity. *Int. J. Biol. Macromol.* 231, 123211, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123211>
2. Barros de Medeiros VP, Leite de Souza E, Rodrigues de Albuquerque TM, da Costa Sassi CF, dos Santos Lima M, Sivieri K, Colombo Pimentel T, Magnani M. 2021. Freshwater microalgae biomasses exert a prebiotic effect on human colonic microbiota. *Algal Res.* 60, 102547, <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102547>
3. Beaumont M, Tran R, Vera G, Niedrist D, Rousset A, Pierre R, Shastri P, Forget A. 2021. Hydrogel-forming algae polysaccharides: From seaweed to biomedical applications. *Biomacromolecules* 22(3):1027-1052. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c01406>
4. Ben Hlima H, Smaoui S, Barkallah M, Elhadef K, Tounsi L, Michaud P, Fendri I, Abdelkafi S. 2021. Sulfated exopolysaccharides from *Porphyridium cruentum*: A useful strategy to extend the shelf life of minced beef meat. *Int. J. Biol. Macromol.* 193 (Part B): 1215-1225, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.161>.
5. Brasil BD, de Siqueira FG, Salum TFC, Zanette CM, Spier MR. 2017. Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories. *Algal Res.* 25: 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.035>
6. Brzozowska W, Sprynskyy M, Wojtczak I, Dąbek P, Witkowski A, Buszewski B. 2020. “Outsourcing” diatoms in fabrication of metal-doped 3D biosilica. *Materials* 13(11): 2576. <https://doi.org/10.3390/ma13112576>
7. Buendía-Flores M, Tavera R, Novelo E. 2015. Florística y ecología de diatomeas bentónicas de la zona lacustre de Xochimilco-Tláhuac, México. *Bot. Sci.* 93(3): 531-558. <https://doi.org/10.17129/botsci.148>
8. Cardozo KH, Guaratini T, Barros MP, Falcão VR, Tonon AP, Lopes NP, Campos S, Torres MA, Souza AO, Colepicolo P, Pinto E. 2007. Metabolites from algae with economical impact. *Comp. Biochem. Physiol.* 146 (1-2): 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2006.05.007>
9. Challouf R, Trabelsi L, Ben Dhieb R, El Abed O, Yahia A, Ghazzi K, Ben Amar J, Omran H, Ben Ouada H. 2011. Evaluation of cytotoxicity and biological activities in extracellular polysaccharides released by cyanobacterium *Arthrospira platensis*. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 54(4):831-838. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000400024>
10. Chen B, You W, Huang J, Yu Y, Chen W. 2010. Isolation and antioxidant property of the extracellular polysaccharide from *Rhodella reticulata*. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 26, 833-840. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0240-y>
11. Cunha L, Grenha A. 2016. Sulfated seaweed polysaccharides as multifunctional materials in drug delivery applications. *Mar. Drugs* 14(3), 42. <https://doi.org/10.3390/md14030042>
12. Decho AW. 1990. Microbial exopolymer secretions in ocean environments: Their roles in food webs and marine processes. *Oceanogr. Mar. Biol: An Ann. Rev.* 28(7): 73-153.
13. Delattre C, Pierre G, Laroche C, Michaud P. 2016. Production, extraction and characterization of microalgal and cyanobacterial exopolysaccharides. *Biotechnol. Adv.* 34(7): 1159-1179. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.08.001>
14. FAO. 2012. Fishery Statistical Collections. Global Aquaculture Production. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/en>. Accesado el 3 de diciembre de 2021.
15. Fimbres-Olivarria D, López-Elías JA, Carvajal-Millan E, Márquez-Escalante JA, Martínez-Córdova LR, Miranda-Baeza A, Enríquez-Ocaña F, Valdéz-Holguín JE, Brown-Bojórquez F. 2016. *Navicula* sp. sulfated polysaccharide gels induced by Fe(III): Rheology and microstructure. *Int. J. Mol. Sci.* 17(8): 1238. <https://doi.org/10.3390/ijms17081238>



16. Fimbres-Olivarria D, Carvajal-Millan E, Lopez-Elias JA, Martinez-Robinson KG, Miranda-Baeza A, Martinez-Cordova LR, Enriquez-Ocaña F, Valdez-Holguin JE. 2018. Chemical characterization and antioxidant activity of sulfated polysaccharides from *Navicula* sp. *Food Hydrocoll.* 75: 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.002>
17. Geresh S, Mamontov A, Weinstein J. 2002. Sulfation of extracellular polysaccharides of red microalgae: preparation, characterization and properties. *J. Biochem. Biophys. Methods.* 50(2-3): 179-187. [https://doi.org/10.1016/S0165-022X\(01\)00185-3](https://doi.org/10.1016/S0165-022X(01)00185-3)
18. Glicksman M. 1987. Utilization of seaweed hydrocolloids in the food industry. *Hydrobiologia* 151: 31-47. <https://doi.org/10.1007/BF00046103>
19. Gügi B, Le Costaouec T, Burel C, Lerouge P, Helbert W, Bardor, M. 2015. Diatom-specific oligosaccharide and polysaccharide structures help to unravel biosynthetic capabilities in diatoms. *Mar. Drugs* 13(9): 5993-6018. <https://doi.org/10.3390/md13095993>
20. Guo W, Zhu S, Li S, Feng Y, Wu H, Zeng M. 2021. Microalgae polysaccharides ameliorates obesity in association with modulation of lipid metabolism and gut microbiota in high-fat-diet fed C57BL/6 mice. *Int. J. Biol. Macromol.* 182:1371–1383. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.05.067.
21. Guzmán S, Gato A, Lamela M, Freire-Garabal M, Calleja JM. 2003. Anti-inflammatory and immunomodulatory activities of polysaccharide from *Chlorella stigmatophora* and *Phaeodactylum tricornutum*. *Phytother. Res.* 17: 665-670, <https://doi.org/10.1002/ptr.1227>
22. Hamed I, Özogul F, Özogul Y, Regenstein JM. 2015. Marine bioactive compounds and their health benefits: a review. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 14(4): 446-465. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12136>
23. Hildebrand M, Manandhar-Shrestha K, Abbriano R. 2017. Effects of chrysolaminarin synthase knockdown in the diatom *Thalassiosira pseudonana*: Implications of reduced carbohydrate storage relative to green algae. *Algal Res.* 23: 66-77. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.01.010>
24. Jiang J-L, Zhang W-Z, Ni W-X, Shao J-W. 2021. Insight on structure-property relationships of carrageenan from marine red algal: A review. *Carbohydr. Polym.* 257, 117642. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117642>
25. Jindal N, Singh DP, Khattar JS. 2013. Optimization, characterization, and flow properties of exopolysaccharides produced by the cyanobacterium *Lyngbya stagnina*. *J. Basic Microbiol.* 53: 902-912. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200201>
26. John BDM. 1994. Alternation of generations in algae: its complexity, maintenance and evolution. *Biol. Rev.* 69(3): 275-291. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1994.tb01272.x>
27. Khan T, Date A, Chawda H, Patel K. 2019. Polysaccharides as potential anticancer agents—A review of their progress. *Carbohydr. Polym.* 210: 412-428. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.064>
28. Kraan S. 2012. Algal polysaccharides, novel applications, and outlook. Ch 22 in *Carbohydrates Comprehensive Studies on Glycobiology and Glycotechnology*. C. F. Chang (Ed.), p.489-53.2 InTechOpen, Londres. doi: 10.5772/51572
29. Lahaye M, Robic A. 2007. Structure and functional properties of ulvan, a polysaccharide from green seaweeds. *Biomacromolecules* 8, 1765-1774. <https://doi.org/10.1021/bm061185q>
30. Le Costaouëc T, Unamunzaga C, Mantecon L, Helbert W. 2017. New structural insights into the cell-wall polysaccharide of the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Algal Res.* 26: 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.07.021>
31. Li H, Zhao H, Gao Z, Song X, Wang W, Yuan F, Feng Y, Zhang Y, Zhang J, Zhang S, Jia L. 2019. The antioxidant and anti-aging effects of acetylated mycelia polysaccharides from *Pleurotus djamor*. *Molecules* 24(15):2698. <https://doi.org/10.3390/molecules24152698>
32. Lordan S, Ross RP, Stanton C. 2011. Marine bioactives as functional food ingredients: potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Mar. Drugs.* 9(6): 1056-1100. <https://doi.org/10.3390/md9061056>
33. Miranda-Arizmendi V, Fimbres-Olivarria D, Miranda-Baeza A, Martínez-Robinson K, Rascón-Chu A, De Anda-Flores Y, Lizardi-Mendoza J, Mendez-Encinas MA, Brown-Bojorquez F, Canett-Romero R, Carvajal-Millan E. 2022. Sulfated polysaccharides from *Chaetoceros muelleri*: Macromolecular characteristics and bioactive properties. *Biology* 11 (10):1476. <https://doi.org/10.3390/biology11101476>



34. Morales-Jiménez M, Gouveia L, Yáñez-Fernández J, Castro-Muñoz R, Barragán-Huerta BE. 2020. Production, preparation and characterization of microalgae-based biopolymer as a potential bioactive film. *Coatings* 10(2), 120. <https://doi.org/10.3390/coatings10020120>
35. Norton TA, Melkonian M, Andersen RA. 1996. Algal biodiversity. *Phycologia* 35(4): 308-326. <https://doi.org/10.2216/i0031-8884-35-4-308.1>
36. Ntie-Kang F, Svozil D. 2020. An enumeration of natural products from microbial, marine and terrestrial sources. *Phys. Sci. Rev.* 5(8): 20180121. <https://doi.org/10.1515/psr-2018-0121>
37. O'Sullivan L, Murphy B, McLoughlin P, Duggan P, Lawlor PG, Hughes H, Gardiner, GE. 2010. Prebiotics from marine macroalgae for human and animal health applications. *Mar. Drugs* 8(7): 2038-2064. <https://doi.org/10.3390/md8072038>
38. Pangestuti R, Kim SK. 2014. Biological activities of carrageenan. *Adv. Food Nutr. Res.* 72: 113-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800269-8.00007-5>
39. Prybylski N, Toucheteau C, Alaoui HE, Bridiau N, Maugard T, Abdelkafi S, Fendri I, Delattre C, Dubessay P, Pierre G, Michaud P. 2020. Bioactive polysaccharides from microalgae. Ch. 20 in *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. E Jacob-Lopes, M Manzoni Maroneze, MI Queiroz, L Queiroz Zepka (Eds.), p. 533-571. Academic Press, Inc., New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818536-0.00020-8>
40. Raposo M, De Morais R, Bernardo de Morais A. 2013. Bioactivity and applications of sulphated polysaccharides from marine microalgae. *Mar. Drugs* 11(1): 233-252. <https://doi.org/10.3390/md11010233>
41. Raposo MF, De Morais AMB, De Morais RMSC. 2015. Marine polysaccharides from algae with potential biomedical applications. *Mar. Drugs*. 13(5): 2967-3028. <https://doi.org/10.3390/md13052967>
42. Rengasamy KR, Kulkarni MG, Stirk WA, Van Staden J. 2014. Advances in algal drug research with emphasis on enzyme inhibitors. *Biotechnol. Adv.* 32(8): 1364-1381. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.08.005>
43. Rengasamy KR, Mahomoodally MF, Aumeeruddy MZ, Zengin G, Xiao J, Kim DH. 2020. Bioactive compounds in seaweeds: An overview of their biological properties and safety. *Food Chem. Toxicol.* 135: 111013. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.111013>
44. Running CA, Falshaw R, Janaswamy S. 2012. Trivalent iron induced gelation in lambda-carrageenan. *Carbohydr. Polym.* 87(4):2735-2739. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.018>
45. Shniukova EI, Zolotareva EK. 2015. Diatom Exopolysaccharides: a Review. *Int. J. Algae* 17(1): 50-67. DOI: 10.1615/InterJAlgae.v17.i1.50
46. Singh J, Saxena RC. 2015. An introduction to microalgae: Diversity and significance. In: *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*. SK Kim (Ed.). Academic Press. Amsterdam. 11-24 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00002-9>
47. Sun T, Tao H, Xie J, Zhang S, Xu X. 2010. Degradation and antioxidant activity of k-carrageenans. *J App. Polym. Sci.* 117: 194-199. <https://doi.org/10.1002/app.31955>
48. Tang DYY, Khoo KS, Chew KW, Tao Y, Ho SH, Show PL. 2020. Potential utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products. *Bioresour. Technol.* 304: 122997. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122997>
49. Tanna, B., Mishra, A. 2019. Nutraceutical potential of seaweed polysaccharides: Structure, bioactivity, safety, and toxicity. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 18(3): 817-831. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12441>
50. Tannin-Spitz T, Bergman M, van-Moppes D, Grossman S, Arad S. 2005. Antioxidant activity of the polysaccharide of the red microalga *Porphyridium* sp. *J. Appl. Phycol.* 17, 215-222 (2005). <https://doi.org/10.1007/s10811-005-0679-7>
51. Torabi P, Hamdami N, Keramat J. 2021. Microwave-assisted extraction of sodium alginate from brown macroalgae *Nizimuddinia zanardini*, optimization and physicochemical properties. *Sep. Sci. Technol.* 57(6): 872-885. <https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1954020>
52. Tseng CK. 2001. Algal biotechnology industries and research activities in China. *J. App. Phycol.* 13(4): 375-380. <https://doi.org/10.1023/A:1017972812576>
53. Underwood GJ, Paterson DM. 2003. The importance of extracellular carbohydrate production by marine epipelagic diatoms. *Adv. Bot. Res.* 40: 183-240. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(05\)40005-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(05)40005-1)



54. Van den Hoek C, Mann DG, Jahns HM. 1995. *Algae: An Introduction to Phycology*. Cambridge University Press, Cambridge.
55. Venugopal V. 2008. Seaweed: Nutritional Value, Bioactive Properties, and Uses. Ch 10 in *Marine Products for Healthcare: Functional and Bioactive Nutraceutical Compounds from the Ocean*. G. Mazza (Ed.), p. 261-296. CRC Press and Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/9781420052640>
56. Vuppaladadiyam AK, Prinsen P, Raheem A, Luque R, Zhao M. 2018. Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review. *Biofuel Bioprod. Biorefin.* 12(2): 304-324. <https://doi.org/10.1002/bbb.1864>
57. Wijesekara I, Pangestuti R, Kim SK. 2011. Biological activities and potential health benefits of sulfated polysaccharides derived from marine algae. *Carbohydr. Polym.* 84:14-21. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.062>
58. Yi T, Shan Y, Huang B, Tang T, Wei W, Quinn NW. 2020. An efficient *Chlorella* sp.-*Cupriavidus necator* microcosm for phenol degradation and its cooperation mechanism. *Sci. Total Environ.* 743, 140775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140775>
59. Yim JH, Kim SJ, Ahn SH, Lee CK, Rhie KT, Lee HK. 2004. Antiviral effects of sulfated exopolysaccharide from the marine microalga *Gyrodinium impudicum* strain KG03. *Mar. Biotechnol.* 6, 17-25. <https://doi.org/10.1007/s10126-003-0002-z>
60. Zaporozhets TS, Besednova NN, Kuznetsova TA, Zvyagintseva TN, Makarenkova ID, Kryzhanovsky SP, Melnikov VG. 2014. The prebiotic potential of polysaccharides and extracts of seaweeds. *Russ. J. Mar. Biol.* 40(1): 1-9. <https://doi.org/10.1134/S1063074014010106>

