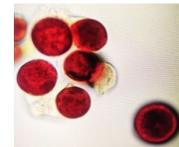
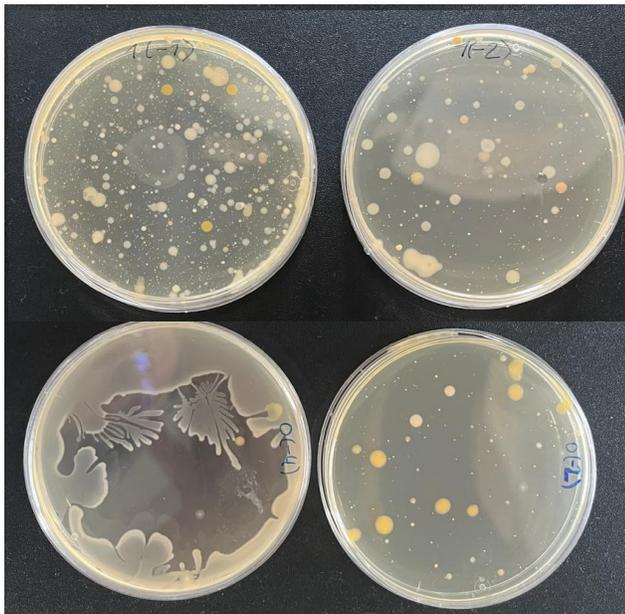
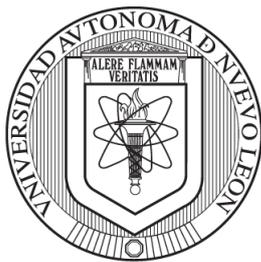


Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos



Publicado en febrero de 2025

Publicación Semestral



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN®

**Una publicación de la
Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dr. En Med. Santos Guzmán López
Rector

Dr. Juan Paura García
Secretario General

Dr. Jaime Arturo Castillo Elizondo
Secretario Académico

Dr. José Javier Villarreal Álvarez Tostado
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas
Dirección de Editorial Universitaria

Dr. José Ignacio González Rojas
Director de la Facultad de Ciencias Biológicas

Dr. Juan Gabriel Báez González
idcyta@uanl.mx
Editor responsable

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

Vol. 10, febrero 2025, es una publicación semestral editada y publicada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Universidad s/n, Cd. Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León. Difusión vía red de cómputo https://idcyta.uanl.mx/index.php/i_idcyta@uanl.mx. Editor responsable: Dr. Juan Gabriel Báez González.

Número de reserva de derechos al uso exclusivo del título *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* otorgada por el Instituto Nacional del Derecho de Autor: 04-2024-011513431400-102, de fecha 15 de enero de 2024.
ISSN 2448-7503.

Fecha de la última modificación, febrero de 2025.

Las opiniones y contenidos expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

Queda Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier forma o medio, del contenido de la publicación sin previa autorización.

Elaboración de harina para waffles reducida en azúcares

Preparation of waffle flour reduced in sugar

Castillo-Loredo, C. L.¹; Jasso-Soto, A. G.²; Flores-Cedillo, M. L.^{3*}

^{1,2} Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital. Estudiante de la División de Ingeniería Industrial. Carr. 57 Méx.-P.N. Tramo Qro-SLP Km 189.100 No. 6501; Villa de Pozos, S.L.P., México.

^{3*} Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de San Luis Potosí, Capital. Docente de la División de Ingeniería Industrial del Carr. 57 Méx.-P.N. Tramo Qro-SLP Km 189.100 No. 6501; Villa de Pozos, S.L.P., México. *

maria.flores@tecsuperiorlsp.edu.mx

RESUMEN

Este proyecto muestra el proceso de elaboración de una harina baja en azúcares que puede ser utilizada para la elaboración de waffles y otro tipo de postres, principalmente para personas con diabetes o quienes simplemente deseen comer de manera más saludable sin incrementar sus niveles de glucosa en sangre y con menos contenido calórico puesto que el consumo de alimentos con elevado contenido de azúcares deriva en graves problemas de salud. Con base en los resultados de los sujetos participantes en el estudio, mostraron un incremento no mayor a 8 mg/dl unidades de glucosa en sangre después de consumir los waffles preparados con esta harina elaborada principalmente con avena, frutas deshidratadas y frutos secos, lo que parece ser una alternativa viable que sustituya los ingredientes tradicionales que se utilizan en la realización del waffle y otros productos de panificación. Los consumidores destacaron su excelente sabor y consistencia por lo que lo recomendarían y desean seguirla consumiendo.

PALABRAS CLAVE

Harina reducida en azúcares, waffles, avena, postre.

ABSTRACT

This project shows the process of making a low-sugar flour that can be used to make waffles and other types of desserts, mainly for people with diabetes or those who simply want to eat healthier without increasing their blood glucose levels. and with less caloric content since the consumption of foods with high sugar content leads to serious health problems. Based on the results of the subjects participating in the study, they showed an increase of no more than 8 mg/dl units of blood glucose after consuming the waffles prepared with this flour made mainly with oats, dehydrated fruits and nuts, which It seems to be a viable alternative that replaces the traditional ingredients used in making waffles and other baking products. Consumers highlighted its excellent flavor and consistency, which is why they would recommend it and want to continue consuming it.

KEYWORDS

Reduced sugar flour, waffles, oatmeal, dessert.

INTRODUCCIÓN

El consumo elevado de azúcares se asocia con diversas patologías como sobrepeso, obesidad, diabetes, enfermedad cardiovascular, entre otras (Cabezas Zabala et al., 2016). El enfoque del presente trabajo abarca a la diabetes, que es una enfermedad grave que ocurre cuando el cuerpo no produce suficiente insulina o no puede utilizarla bien provocando que se acumulen altos niveles de glucosa en la sangre (Peralta-Álvarez et al., 2016), por lo que se ha convertido rápidamente en la epidemia del siglo XXI y en un reto de salud global (Partearroyo, 2013).

De acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud indican que existen más de 347 millones de personas con diabetes (OMS, 2023) y en México, casi 4 de cada 10 personas mayores de 15 años sufren de obesidad debido a los altos contenidos de azúcar en sus dietas (El País, 2023b).

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

En la Edad Antigua, los ingredientes típicos usados en repostería eran frutos secos, fermentos y miel; y la combinación de ellos dio lugar a diferentes opciones de repostería la cual nació de manera paralela al desarrollo del azúcar, pues los primeros registros de recetas dulces aparecen en las civilizaciones mesopotámica y egipcia, hace casi 7.000 años, con el uso de la miel (Leschziner & Dakin, 2014).

Los postres comúnmente tienen mala reputación puesto que tienden a tener un mayor contenido de azúcar y carbohidratos (El País, 2023a), si bien el azúcar puro y los carbohidratos refinados como la harina blanca hacen que el nivel de azúcar en la sangre se dispare, agregar otros nutrientes puede retardar la descomposición de la glucosa y mitigar esos efectos, por lo que si se tiene diabetes, lo ideal es buscar postres que contengan cereales integrales, proteínas o grasas (Clean Plates Editors, 2023). Otra opción es el uso de edulcorantes como una alternativa eficaz en las estrategias de control y prevención del sobrepeso y de la obesidad (Salud y Medicina, 2023).

En la Tabla I se muestra un comparativo de diversos postres que han sido seleccionados como los de mayor preferencia por parte de los consumidores, los cuales presentan características comunes como la elección de los elaborados con ingredientes saludables que sean bajos en azúcares, con frutos secos y semillas, sin gluten, con fibra y chocolate amargo o de cacao.

Marca	Características	Referencia
Sweedi®	Postres libres en azúcar elaborados con insumos bajos en calorías y endulzados con Stevia(R), está dirigido a personas que necesitan comer postres con características nutricionales especiales.	(Martel Bottger et al., 2018)
Snickfit®	Realizado con chocolate amargo al 70 % libre de azúcar y leche con cacahuates, avellanas, avena, aceite de coco y está endulzado con Stevia®.	(Velásquez, 2023)
Kahan®	Son alfajores de pistache con galleta de almendras, cubierta con chocolate al 70 % de cacao.	(Yáñez Santamaría et al., 2021)
Perucha®	Postre saludable y vegano bañado en chocolate rellenas de coco o cacahuete. Sin azúcar refinada añadida y libre de gluten.	(Navarro Palacios, 2021)
Snix Bars®	Barras nutritivas veganas libres de gluten y azúcares refinadas con cacahuete, almendras, avellana y granola.	(The Militant Baker, 2012)
Bite®	Postre sin azúcar refinada y sin gluten con chocolate.	(Hernández, 2023)
Guilt Free®	Utiliza materia prima natural especializada en productos KETO libre de azúcar, gluten, harinas refinadas y conservadores.	(Guilt Free, 2021)

Elaboración propia.

MATERIALES

La propuesta de esta harina es cambiar los ingredientes para la preparación de la masa del wafle convencional haciendo una masa original integrada por materias primas más saludables conformada por una base de yogurt natural elaborado artesanalmente sin grasa ni calorías, avena, papaya, fresa, arándanos, plátano, nuez y almendras.

METODOLOGÍA

Diseño experimental

El diseño experimental consistió de un estudio piloto con 5 personas mayores de edad, las cuales firmaron una carta de consentimiento informado para participar voluntariamente en el estudio. Se les midieron los niveles de azúcar antes y después de consumir el waffle elaborado con la harina baja en azúcar y 40 minutos después de su consumo empleando el equipo para medición del nivel de azúcar en la sangre mostrado en la Ilustración 1, el cual consiste en un glucómetro (marca Roche®, modelo Accu-Chek® Instant; Suiza) y las lancetas (marca Roche®, modelo Accu-Chek Softclix®; Polonia) y tiras reactivas (marca Roche®, modelo Accu-Chek® Instant; Suiza) previamente limpiando el dedo en el que se tomará la muestra con una torunda de algodón llena de alcohol de 70° G.L. (marca Dalux®, México).



Ilustración 1. Kit para la toma de muestras de glucosa.

El modelo estadístico para determinar diferencias significativas y comparar el antes y después del consumo del waffle se llevó a cabo mediante una prueba t de Student para comparar las medias entre los dos grupos. Se utilizó el software Minitab®, versión 2021.

El procedimiento de elaboración de la harina se muestra en la Ilustración 2 y consiste en los pasos que se mencionan a continuación:

a) mezcla y molienda de la avena con las frutas deshidratadas (papaya, fresa, arándanos, plátano) y frutos secos (nuez y almendras) hasta que se integren completamente; b) colado y cernido de la harina hasta tener una consistencia muy fina; c) se bate la mezcla de la masa con el yogurt natural; d) se pasa a una waflera eléctrica (marca Curran® Modelo HT2240, China) para formar el waffle por un tiempo estimado de 3 a 5 minutos alcanzando una temperatura de 185 °C y, por último; se puede acompañar al gusto del consumidor de distintos *toppings*. Se aprecia que con esta harina se obtiene una consistencia adecuada para elaborar waffles de 75 gramos, esta harina además permite elaborar otros productos de panificación.

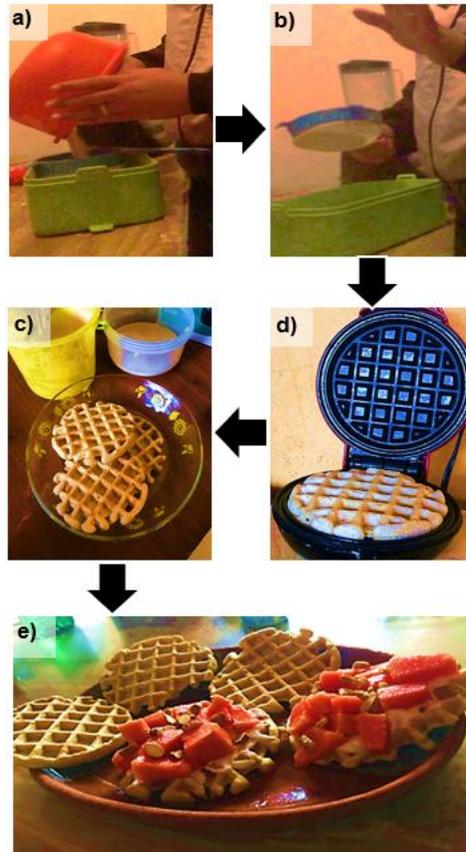
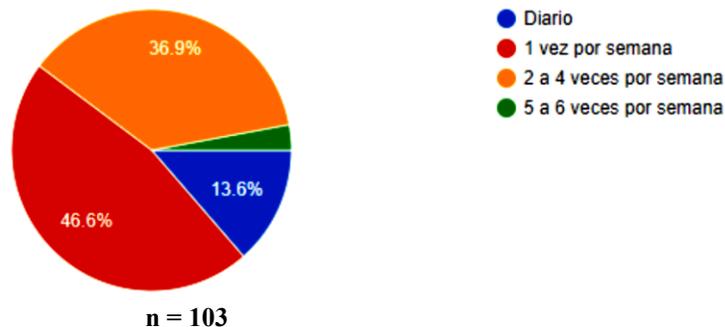


Ilustración 2. Flujo del proceso de elaboración de la harina baja en azúcar para waffles.

RESULTADOS

Se diseñó un instrumento de recolección de datos en el que se preguntó a 103 personas mayores de edad las preferencias de consumo de postres.

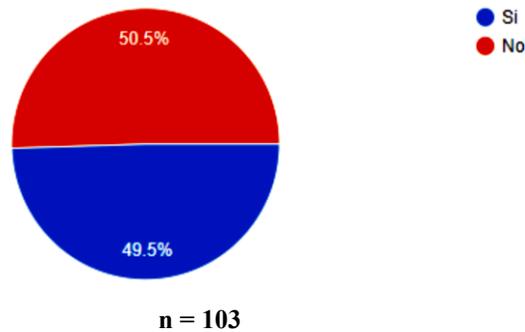
En la Gráfica 1 se observa que el 13.6 % consumen postres diariamente, el 46.6 % contestaron que consumen postres 1 vez por semana, 36.9 % contestaron que consumen postres de 2 a 4 veces por semana y 2.9 % consumen postres 5 o 6 veces por semana, por lo que se considera que la harina propuesta por su bajo contenido de azúcar puede favorecer a varios consumidores frecuentes.



Gráfica 1. Frecuencia de consumo de postres.
Elaboración propia.

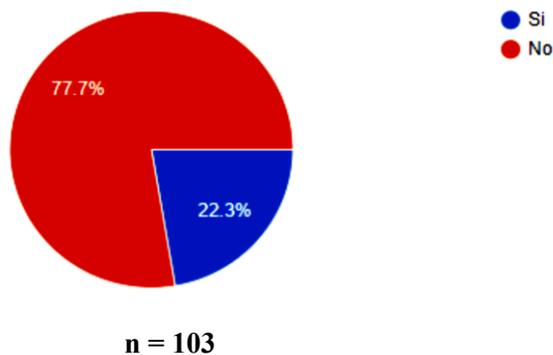
Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

También se les preguntó si conocen la dieta recomendada para una persona con diabetes, a lo que prácticamente la mitad de los encuestados respondió que no (ver Gráfica 2).

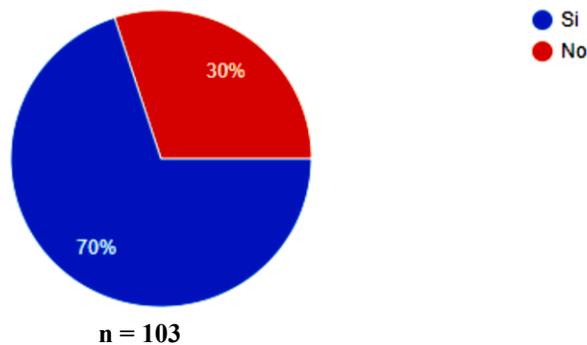


Gráfica 2. Conocimiento sobre la dieta que debe llevar una persona diabética.
Elaboración propia.

Otro dato interesante fue que, de las 103 personas encuestadas, una quinta parte aproximadamente tenían conocimiento de que padecían diabetes (ver Gráfica 3) o por lo menos tenía el 70 % de ellas un familiar o conocido con esta enfermedad (ver Gráfica 4).



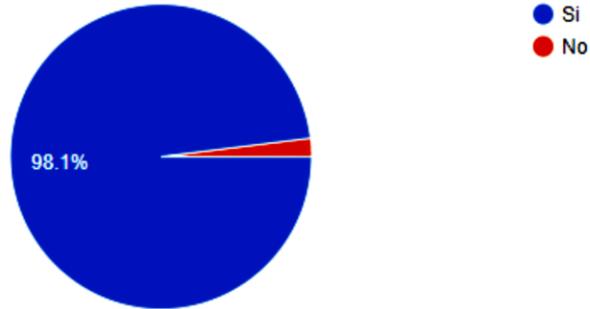
Gráfica 3. Personas encuestadas que tienen diabetes.
Elaboración propia.



Gráfica 4. Personas encuestadas que tienen un conocido o familiar con diabetes.
Elaboración propia.

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

De las personas encuestadas ya sea que tuvieran o no diabetes, el 98 % mencionó su preferencia por consumir un waffle que le permitiera mantener estables sus niveles de glucosa en sangre (ver Gráfica 5).



n = 103

Gráfica 5. Preferencia por el consumo de un waffle bajo en azúcares.
Elaboración propia.

En la Ilustración 3 se muestra la presentación final de la harina baja en azúcares preparada con sus *toppings* colocados de manera opcional.



Ilustración 3. Waffles preparados con la harina baja en azúcar.

Los datos obtenidos de los sujetos participantes en el estudio indicaron que después de consumir el waffle, el nivel de glucosa en la sangre no tuvo un incremento mayor de 8 mg/dl (ver Tabla II).

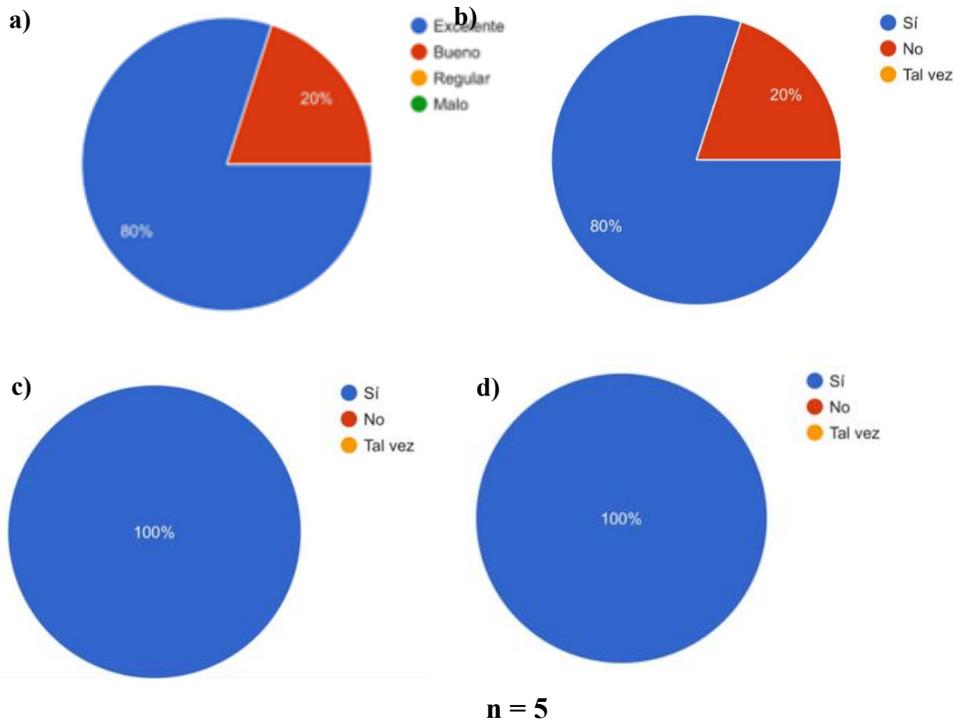
Tabla II. Resultados de niveles de glucosa en sangre antes y después del consumo del waffle elaborado con la harina reducida en azúcar.

Consumidor	Antes (mg/dl)	Después (mg/dl)	Diferencia (mg/dl)
1	100	108	+8
2	97	100	+3
3	126	132	+6
4	112	118	+6
5	117	125	+8

Elaboración propia.

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Se aplicó una encuesta de satisfacción a los consumidores que probaron los waffles elaborados con la harina reducida en azúcar, obteniendo los resultados mostrados en la Gráfica 6 en a) se muestra que al 80 % le pareció excelente el sabor del waffle y al 20 % le pareció bueno su sabor; el 80 % considera que su sabor sí es distinto al del waffle convencional y el 20 % no lo percibió (ver Gráfica 6 b). Al 100 % de las personas encuestadas les pareció adecuada la consistencia del waffle elaborado con esta harina reducida en azúcares como se muestra la Gráfica 6 c). En la Gráfica 6 d) menciona que el 100 % de los encuestados sí recomendarían a otras personas el consumo de esta harina.



Gráfica 6. Respuestas de consumidores acerca del waffle elaborado con la harina reducida en azúcares: a) Percepción del sabor; b) Diferencia del sabor del waffle entre la harina y la baja en azúcares; c) Gusto por la consistencia del waffle con la harina y d) Recomendarían el consumo de esta harina. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Gracias a la combinación de ingredientes a base de avena, yogurt natural, frutas deshidratadas y frutos secos, se logró elaborar una harina reducida en azúcares y baja en calorías que podrá sustituir a la harina convencional ayudando a mantener estables los niveles de glucosa de los consumidores por lo que se recomendaría su consumo por personas diabéticas o simplemente por personas que deseen cuidar su salud ya que actualmente existe una tendencia por consumir alimentos con altos niveles de glucosa y exceso de calorías.

De acuerdo con las opiniones de los consumidores, el sabor les pareció excelente, además de que no se perciben diferencias notables con respecto a la harina de los waffles tradicionales, asimismo, la consistencia de la harina es la adecuada para un waffle apetitoso por lo que recomendarían su consumo.

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Esta harina reducida en azúcares además de emplearse en la elaboración de waffles podría ser empleada en la preparación de otros productos de panificación para contribuir a que las personas que lo consuman tengan un menor riesgo de incrementar sus niveles de glucosa en sangre.

Se deben de realizar otros estudios para evaluar las propiedades nutrimentales de la harina, así como ampliar el tamaño de muestra de los consumidores para conocer otras áreas de oportunidad del producto.

REFERENCIAS

- Cabezas Zabala, C. C., Hernández Torres, B. C., & Vargas Zárate, M. (2016). Azúcares adicionados a los alimentos: Efectos en la salud y regulación mundial. Revisión de la literatura. *Revista de la Facultad de Medicina*, 64(2), 319-329. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v64n2.52143>
- Clean Plates Editors. (2023). 8 *Diabetic Desserts Low In Sugar But Still Super Tasty*. <https://cleanplates.com/recipes/diabetic-desserts/>
- El País. (2023a). *Los postres que elevan rápidamente la glucosa en la sangre*. <https://www.elpais.com.co/salud/los-postres-que-elevan-rapidamente-la-glucosa-en-la-sangre-0247.html>
- El País. (2023b). *México, el país con más casos de diabetes y el segundo en obesidad entre los miembros de la OCDE*. <https://elpais.com/mexico/2023-11-08/mexico-es-el-segundo-pais-con-mas-personas-obesas-de-la-ocde.html>
- Guilt Free. (2021). *Guilt Free | Productos keto, saludables, sin gluten, sin azúcar, vegan*. <https://guiltfree.com.mx/>
- Hernández, D. (2023). *Galletas tipo bites sabor chocolate: Disfruta de un postre crujiente con esta rápida receta*. <https://www.gastrolabweb.com/postres/2023/9/21/galletas-tipo-bites-sabor-chocolate-disfruta-de-un-postre-crujiente-con-esta-rapida-receta-40591.html>
- Leschziner, V., & Dakin, A. (2014). Hacia una teoría de la cocina desde el Medioevo hasta la Edad Moderna: Estructuras cognitivas, biología del gusto y convenciones culinarias. *Revista Colombiana de Sociología*, 37(1), 199-218.
- Martel Bottger, G. B., Ramírez Abello, P. C., & Yataco, J. A. (2018). *Postres saludables Sweedi*.
- Navarro Palacios, M. (2021). *La Perucha: Marca de postres veganos crecerá con “dark kitchens” y nuevos puntos de venta*. <https://gestion.pe/economia/empresas/la-perucha-marca-de-postres-veganos-crecera-con-dark-kitchens-y-nuevos-puntos-de-venta-noticia/>
- OMS. (2023). *Diabetes*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>
- Partearroyo, T. (2013). *El azúcar en los distintos ciclos de la vida: Desde la infancia hasta la vejez*. 40(43), 40-47.
- Peralta-Álvarez, D., Espinosa-Cristóbal, L. F., Carreón-Burciaga, R. G., Bologna-Molina, R., González-González, R., Gómez-Palacio-Gastelum, M., & Donohé-Cornejo, A. (2016). Evaluación de la enfermedad periodontal e hiperglucemia asociados con diabetes mellitus tipo 2 en pacientes del estado de Durango, México. *Revista Dental Mexicana*, 73(2), 72-80.
- Salud y Medicina. (2023). *Los expertos urgen a regular el azúcar que se añade a los alimentos*. <https://saludymedicina.org/post/los-expertos-urgen-a-regular-el-azucar-que-se-anade-a-los-alimentos>
- The Militant Baker. (2012). *Snix bars = Snickers + Twix + Awesome*. <http://www.themilitantbaker.com/2012/08/snix-bars-snickers-twix-awesome.html>
- Velásquez, G. V. C. (2023). Aporte nutricional y perfil sensorial del panetón enriquecido con almendras, pasas y arándanos deshidratados I. *Agronomía Mesoamericana*, 34(2), 1-14.
- Yáñez Santamaría, C., Flores Vega, A. V., & Gutiérrez Muñoz, O. (2021). *La gastronomía como extensión del conocimiento*. Clave Editorial.

Una Perspectiva de las Aplicaciones de las Macroalgas en la Agricultura y la Alimentación

A Perspective of the Applications of Macroalgae in Agriculture and Food

Celestino García Gómez¹; Carolina Cruz-Martínez¹; Debanhy Alejandra Cuellar-Olivares; ¹ Frida Lizeth Esparza-Montenegro¹; Ángel Renato León-Félix¹; Joel Horacio Elizondo-Luévano^{1,*}

Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, C.P. 66050, General Escobedo, Nuevo León, México;

celestino.garciagm@uanl.edu.mx (C.G.-G.); carolina.cruzmr@uanl.edu.mx (C.C.-M.);

alejandra.cuellarolvs@uanl.edu.mx (D.A.C.-O.); frida.esparzamo@uanl.edu.mx (F.L.E.-M.);

angel.leonfl@uanl.edu.mx (A.R.L-F.); joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.)

* **Correspondencia:** joel.elizondolv@uanl.edu.mx (J.H.E.-L.)

RESUMEN

Este artículo de revisión se centra en el estudio de las macroalgas, su uso en agricultura y alimentación desde el punto de vista de la bioinformática. El artículo comienza con las generalidades de las macroalgas, donde son organismos fotosintéticos que prosperan en ambientes acuáticos y como es que se utilizan como fuente de nutrientes. Aquí destacan sus diferentes aplicaciones tanto en agricultura como en nutrición animal y humana, destacando su capacidad para ser fuente de proteínas vegetal y sostenibles. Se describieron y catalogaron las macroalgas (algas pardas, algas rojas y algas verdes) según color, composición nutricional y compuestos bioactivos. Se nombraron algunos ejemplos de especies de algas de cada tipo, como las algas verdes (*Ulva*, *Codium* y *Chaetomorpha*) y las algas pardas (*Fucus*, *Laminaria*, *Sargassum*). También se menciona el ciclo de vida y reproducción de las macroalgas, y se mencionaron algunas técnicas bioinformáticas utilizadas para el análisis de estas algas. Se revisaron 40 artículos de las bases de datos de Elsevier, Springer, PubMed y Google Scholar con un corte de búsqueda desde 2006 hasta mayo del 2024.

Palabras Clave: Macroalgas, Alimentación, Chlorophyta, Composición nutricional, NGS, Phaeophyta, Rhodophyta, *Spirulina*, *Ulva*

ABSTRACT

This review article focuses on the study of macroalgae, and their use in agriculture and food from a bioinformatics point of view. The article begins with macroalgae, which are photosynthetic organisms that thrive in aquatic environments, and how they are used as a source of nutrients. Here, their different applications in agriculture, animal, and human nutrition are highlighted, emphasizing their capacity to be a source of vegetable and sustainable proteins. Macroalgae (brown algae, red algae, and green algae) were described and catalogued according to color, nutritional composition, and bioactive compounds. Some examples of algae species of each type were named, such as green algae (*Ulva*, *Codium*, and *Chaetomorpha*) and brown algae (*Fucus*, *Laminaria*, *Sargassum*). The life cycle and reproduction of macroalgae and some bioinformatics techniques used to analyze these algae are also mentioned. Forty articles were reviewed from Elsevier, Springer, PubMed, and Google Scholar. Forty articles from the Elsevier, Springer, PubMed, and Google Scholar databases were reviewed with a search cutoff from 2006 to May 2024.

Keywords: Macroalgae, Feeding, Chlorophyta, Nutritional composition, NGS, Phaeophyta, Rhodophyta, *Spirulina*, *Ulva*.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las macroalgas han ganado cada vez más interés debido a sus diversas propiedades promotoras de la salud que pueden disminuir los riesgos de muchas enfermedades crónicas e incluso ayudar a prolongar la vida útil, así mismo estas se han utilizado como fertilizante natural minimizando la necesidad de fertilizantes químicos y en el tratamiento de aguas residuales (Biris-Dorhoi et al., 2020). Las macroalgas, mejor conocidas como algas marinas (Figura 1), son organismos fotosintéticos que crecen en ambientes acuáticos. Estas algas son una fuente abundante de nutrientes, compuestos bioactivos y tienen diversas aplicaciones. En la presente revisión abordamos las actividades biológicas de las macroalgas tanto como las herramientas bioinformáticas que fueron utilizadas en su estudio y aplicación, ya que las macroalgas también son una fuente acuática de muy alto potencial para producir proteínas que sostenibles y libre de animales, y se adhieren, por ejemplo, a las preferencias dietéticas veganas. Además, las algas marinas suelen destacar por sus propiedades nutraceuticas y beneficiosas para la salud (Adarshan et al., 2023). Se clasifican en los siguientes tipos (Figura 1) según su composición morfológica:

Algas verdes (Chlorophyta): Las algas verdes son las más comúnmente conocidas, son organismos que pertenecen a la clase *Chlorophyceae* (phylum *Chlorophyceae*), incluidas las especies microscópicas y macroscópicas. Estas algas son el grupo más diverso, con más de 13,000 especies; se estima que alrededor de la mitad de estas especies son algas marinas. El color característico se debe a la presencia de la clorofila *a* y *b*, pigmento que es utilizado durante el proceso fotosintético (Adarshan et al., 2023). Su color depende generalmente del equilibrio entre estas clorofilas y otros pigmentos, como el β -caroteno y las xantofilas. Las algas verdes son muy comunes en áreas donde la luz es abundante, como aguas poco profundas y las piscinas naturales. El género principal de estas incluye *Ulva*, *Codium*, *Chaetomorpha* y *Cladophora* (Makkar et al., 2016).

Algas rojas (Rhodophyta): En comparación con las algas verdes y pardas, las rojas (clase *Rhodophyceae*) contienen una gran cantidad de proteínas, estas alcanzan el 47 % de una materia seca. Las proteínas pertenecientes a este grupo de algas marinas que están formadas por cadenas de aminoácidos, especialmente la glicina (Gly), alanina (Ala), arginina (Arg), prolina (Pro), el ácido glutámico (Glu) y aspártico (Asp) (las cuales componen gran parte de la fracción de aminoácidos), mientras tanto la tirosina, la metionina y la cisteína aparecen en una cantidad mucho menor. Los ácidos glutámico y aspártico, que tienen cadenas laterales ácidas a un pH neutro, en las algas rojas representan el 14-19 % de los aminoácidos (Moreda-Piñeiro et al., 2012)

Algas pardas (Phaeophyta): En general, las algas pardas de la clase *Phaeophyceae* son las algas marinas con el menor contenido de proteínas, a comparación con las algas rojas y verdes. El contenido de proteína más determinado en las algas marrones se da en un rango declarado del 5 al 15 %. Las concentraciones de EAA en las algas pardas difieren sustancialmente entre las especies. Las concentraciones de treonina, valina, isoleucina, leucina, fenilalanina, lisina y metionina fueron más altas en *Undaria pinnatifida* que en *Laminaria* spp.; sin embargo, *Laminaria* spp. Destacó ya que tenía concentraciones más altas de cisteína (Cys) que en *Undaria pin* (Gupta & Abu-Ghannam, 2011).

Las algas pardas son fuentes equilibradas de omega 3 y 6. Las algas marrones, como *Undaria pinnatifida*, *Laminaria* spp. y *Hizikia fusiforme*, contienen predominantemente 20 ácidos eicosapentaenoicos poliinsaturados y ácido araquidónico. El ácido palmítico es uno de los más abundantes, pero no tan abundantes como en la mayoría de las algas rojas. En general, otros ácidos grasos, abundantes en las algas pardas, son los ácidos grasos esenciales, como el oleico, linoleico, linolénico y los precursores de los eicosanoides, el ácido araquidónico y el ácido eicosapentaenoico, más aparte algunos ácidos grasos saturados y monoinsaturados se encuentran en abundancia solo en algunas algas pardas (*Laminaria* sp. y *Undaria pinnatifida*), como el ácido mirístico y el palmitoleico (Gupta & Abu-Ghannam, 2011).

Importancia actual del uso de las macroalgas

La principal aplicación industrial de las algas marinas es la producción de los hidrocoloides como alginato, agar y cartagenina, las cuales se utilizan como agentes gelificantes para la industria

alimentaria. Con unos 25 millones de toneladas cultivadas en 2019, más del 70 % son corrientes secundarias y/o residuales ricas en minerales y proteínas. Dentro de la industria de los hidrocoloides, las algas rojas pertenecientes a los géneros *Eucheuma*, *Chondrus*, *Kappaphycus*, *Hypnea* y *Gigartina* se utilizan comúnmente como fuentes para la extracción de carragenano. Las algas rojas se consideran de alto valor para aplicaciones alimentarias por su muy alto contenido de proteínas, alcanzando más del 47 % de la materia seca y destacan como una fuente prometedora de proteínas alternativas para incrementar la sostenibilidad alimentaria mundial (Morais et al., 2020).

En otros campos como en la biología y la química, la investigación centrada en las ómicas ha proporcionado grandes beneficios significativos a lo largo de las últimas dos décadas, debido en gran parte a los rápidos avances en la secuenciación de ácidos nucleicos (es decir, secuenciación de próxima generación; NGS) y la identificación de proteínas y metabolitos (es decir, varios modos de espectrometría de masas). Estos avances han facilitado investigaciones orgánicas en profundidad, como los roles, relaciones y funciones de las biomoléculas (por ejemplo, genes, proteínas y metabolitos) (Patwary et al., 2021). En esta revisión se abordará los principales beneficios que se pueden tener de las macroalgas en el campo agrícola y alimentaria utilizando a la par herramientas bioinformáticas.

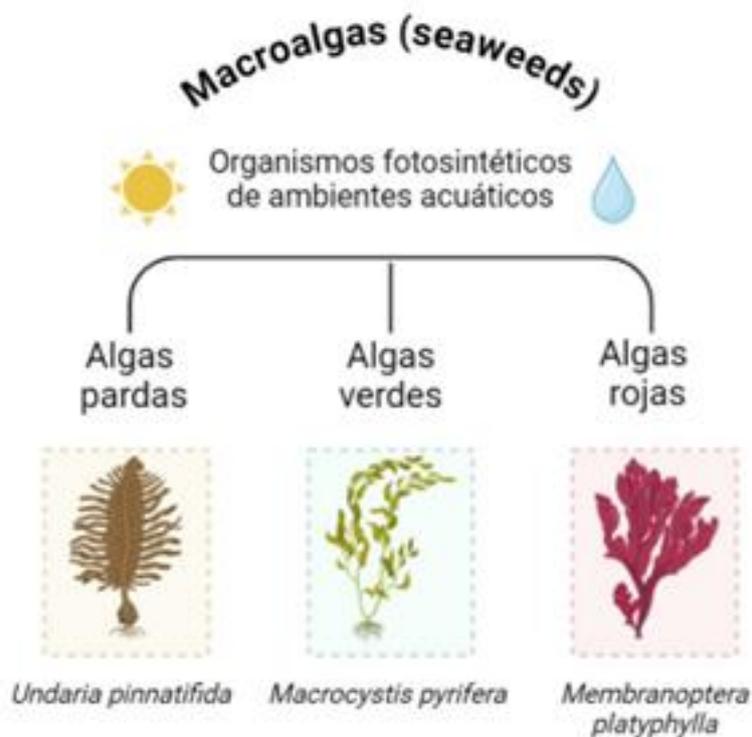


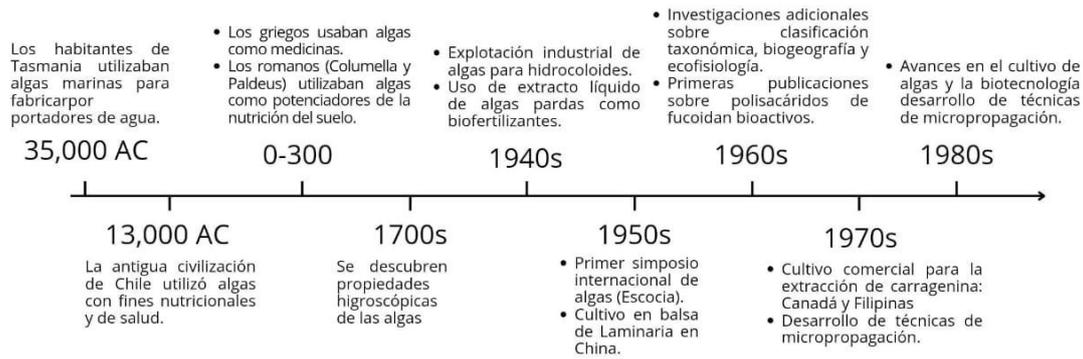
Figura 1. Diagrama de la clasificación general de las macroalgas. Elaborado por BioRender.

MÉTODOS

El propósito del artículo es adjuntar información relevante a las utilidades de las macroalgas en relación de la agricultura y alimentos mediante el uso de técnicas bioinformáticas, se revisaron 40 artículos de las bases de datos de Elsevier, Springer, PubMed y Google scholar y el corte fue de aproximadamente 19 años del 2006 hasta mayo del 2024 las palabras clave para la búsqueda fueron "bioinformatics", "seaweeds", "macroalgas", "industria alimentaria", "agrícola", "bioactivos", "generalidades de las macroalgas".

BIOLOGÍA Y DIVERSIDAD DE LAS MACROALGAS

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos



Las algas conforman a un diverso conjunto de organismos vivos, de los cuales se clasifican dentro de dos reinos y cuatro filos. Muchas sino es que todas las macroalgas son bastante llamativas por sus diversas coloraciones y se les es también conocidas por nombre como los ornamentales del océano. Por otra parte, se tiene registros del uso de las macroalgas dentro de la historia de la humanidad a lo largo de todas las épocas (Figura 2) (Baweja et al., 2016).

Figura 2. Línea del tiempo acerca de los usos antropológicos de las algas. Elaborado mediante Canva.

Las algas se posicionan dentro de los componentes bióticos de gran importancia en los diferentes ecosistemas marinos. Y es así como su distribución depende de muchos factores como físicos, químicos y biológicos (Baweja et al., 2016). En conjunto con los animales coralinos se clasifican dentro de los organismos bentónicos dominantes, donde normalmente se usa como un efectivo indicador sobre la salud dentro de los ecosistemas. Además, son de utilidad para la red alimenticia de los ecosistemas marinos, siendo directamente alimento para organismos como los erizos de mar y de algunos peces. Las macroalgas son también funcionales como refugios y áreas reproductivas para ciertas especies de peces, mamíferos, invertebrados, etc. estas pueden alterarse dado a los cambios ambientales, y cambiar para adaptarse, esto tanto alteraciones físicas como químicas. Es así como condiciones físicas como la recirculación del agua de mar provoca un estrés mecánico a las algas, donde en este caso reaccionan generando cambios fisiológicos teniendo un fuerte asidero, estípites flexibles y espadas. La flexibilidad de las algas permite doblarse hacia el sustrato a medida que la energía de las olas los envuelve (Baweja et al., 2016).

CICLO DE VIDA Y REPRODUCCION DE LAS MACROALGAS

ALGAS VERDES

Las algas verdes se adecuan a un grupo bastante diverso referido morfológicamente, puesto que, incluye miembros de caracteres unicelulares, coloniales, como además están los de formas filamentosas y parenquimatosas, donde pueden llegar a ser individuos de tamaños microscópicos hasta haber de grandes longitudes, llegando a alcanzar más de un metro de largo.

Organización celular

La pared celular de las algas verdes consiste en una estructura fibrilar de celulosa, aunque algunos géneros pueden contener xilosa, manosa o carbonato de calcio. Pueden tener uno o varios cloroplastos por célula y pigmentos como clorofila, betacaroteno, luteína, violaxantina y zeaxantina, similares a los de plantas vasculares y briófitos. Su reserva principal es el almidón, aunque algunas almacenan aceite y pueden tener flagelos, generalmente 2 o 4 por célula, simples o plumosos, en la región anterior. La mayoría de las células flageladas tienen un estigma en el cloroplasto, cerca de los flagelos (Mansilla et al., 2013).

Ciclo de vida de *Ulva Lactuca*

Ulva lactuca, al igual que muchas algas verdes, presenta alternancia de generaciones. El esporófito diploide, compuesto por una fronda de dos hileras de células, se divide por meiosis para producir esporas haploides móviles. Estas zoosporas, con cuatro flagelos, nadan hasta encontrar un sustrato adecuado, donde pierden sus flagelos y se dividen por mitosis, formando un filamento que se desarrolla en una fronda similar a la del esporófito. Este ciclo de vida isomórfico produce gametofitos y esporofitos con el mismo aspecto. En las especies del género *Ulva*, los gametos femeninos y masculinos son indistinguibles, haciendo que estas especies sean isógamas. Otras algas verdes, incluidas algunas especies de *Ulva*, son anisógamas, con gametos femeninos significativamente más grandes que los masculinos (Figura 3) (Marina et al., 2015).

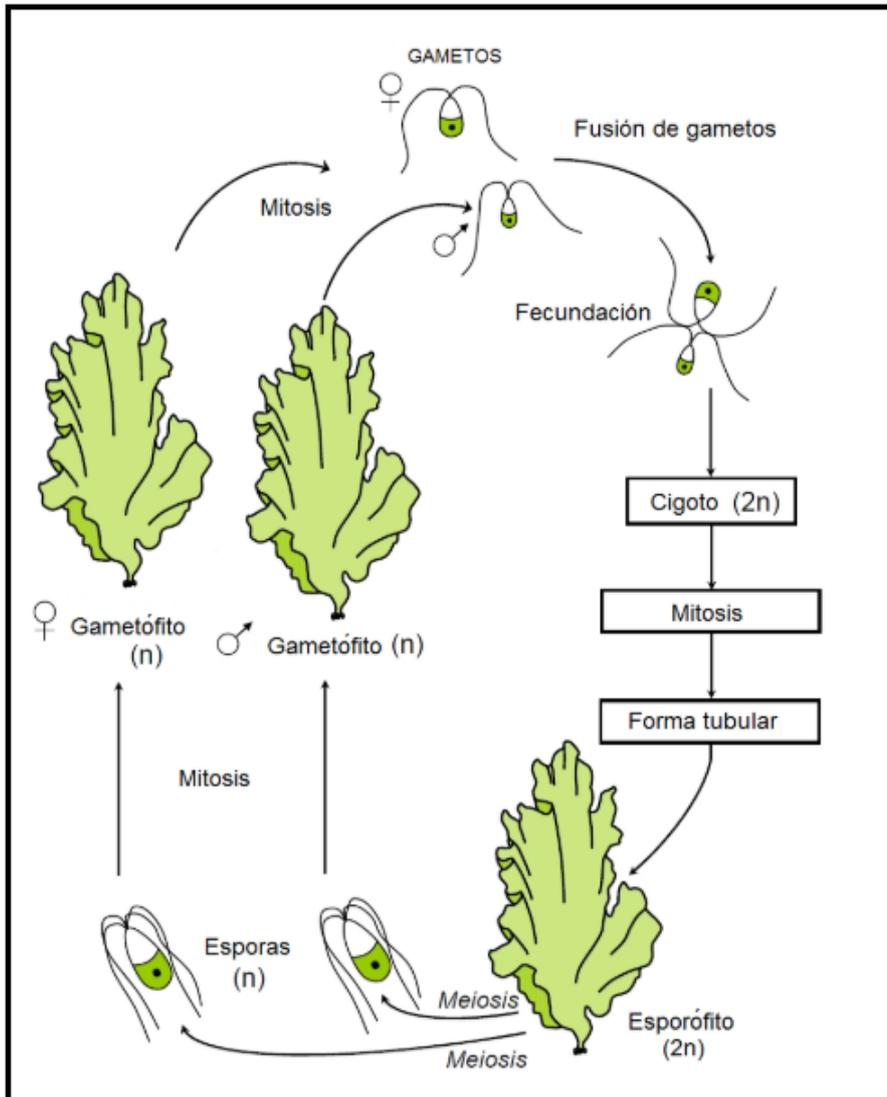


Figura 3. Diagrama del ciclo de vida de *Ulva lactuca* (Marina et al., 2015).

ALGAS PARDAS

Las algas pardas no presentan formas coloniales ni unicelulares, salvo en gametos y esporas. Las formas más simples son pluricelulares microscópicas y de hábitos epífitos, mientras que las más complejas son bentónicas y pueden alcanzar hasta cerca de 60 metros de longitud, como en el caso de *Macrocystis* (Mansilla et al., 2013).

Organización celular

Desde el punto de vista citológico, la pared celular de las algas pardas tiene una fracción sólida de celulosa y alginato, y una mucilaginoso de alginato y fucoídina. Los alginatos son sales de ácido algínico con cationes como Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ y K^+ . Los plastos contienen clorofilas a y c, fucoxantina y carotenoides. La sustancia de reserva es laminarina (Ribamar Da Cruz et al., 2015).

Reproducción y ciclo de vida

Las macroalgas laminarias presentan un ciclo biológico (Figura 4) que alterna entre una generación de filamentos microscópicos, denominada gametófito por su producción de gametos, y una generación caracterizada por una fronda de varios metros de longitud, conocida como esporófito, que produce esporas (Peteiro et al., 2016).

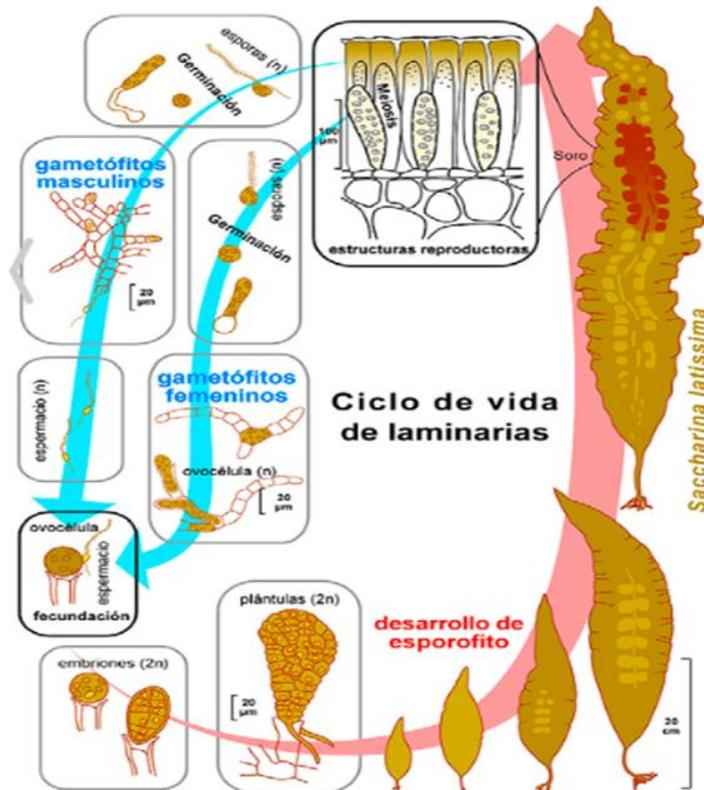


Figura 4. Diagrama del ciclo de vida de *Saccharina latissima* (Peteiro et al., 2016).

ALGAS ROJAS

Las algas rhodophytas, poseen diversidad de especies y tipos de reproducción, considerándose un pináculo de la evolución en el reino algal. En cuanto a sus pigmentos fotosintéticos, las algas rojas emplean clorofila a y d, junto con pigmentos accesorios como las ficobilinas y carotenoides (Dreckmann et al., 2013).

Organización celular

La pared celular de las algas rojas está constituida por una pared interna y rígida, la cual está formada por microfibrillas de celulosa y mucilaginoso, compuesta por galactanos, (agar o carragenano); por otra parte, también es posible encontrar algunas algas rojas que presentan en la pared depósitos de carbonato de calcio, obteniendo un aspecto rígido a estas algas. Es así como los depósitos pueden estar formados de aragonita o calcita, como sucede en las algas coralinas. La cantidad de cloroplastos celular varía y generalmente se presentan ovalados o discoidales, además se caracteriza por la presencia de clorofila, carotenoides (principalmente betacaroteno) y de ficobiliproteínas; estos últimos pigmentos siempre se encuentran asociadas formando los

ficobilisomas (en la membrana de los tilacoides) y están principalmente conformados por ficocianina, aloficocianina, y ficoeritrina (Mansilla et al., 2013). Poseen rodoplastos no asociadas al retículo endoplásmico y tilacoides aislados y equidistantes, separados por bandas de uno a uno en el rodoplasto (Dreckmann et al., 2013).

Reproducción y ciclo de vida

Las algas rojas se reproducen asexualmente mediante esporas que regeneran el talo original y sexualmente con gametos masculinos ("espermátidas") y femeninos ("carpogonios"). Las espermátidas se liberan en los márgenes de las láminas y las carpogonios tienen estructuras receptoras llamadas "tricóginos" para la fertilización, donde las espermátidas se adhieren para iniciar el proceso (Figura 5) (Bañeras, 2014).

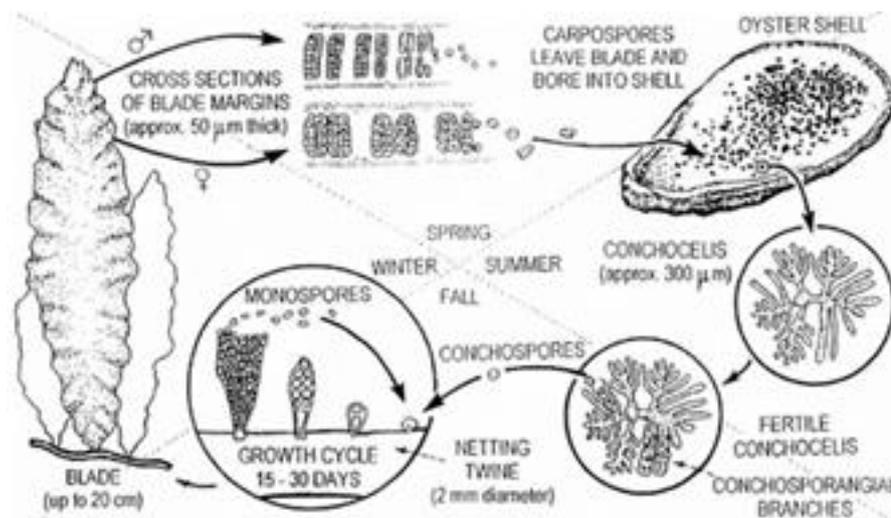


Figura 5. Esquema del ciclo de vida de las algas rojas (Bañeras, 2014).

FACTORES QUE AFECTAN A LAS MACROALGAS

La propagación, abundancia y composición general de las macroalgas están determinadas por distintos factores como salinidad, temperatura, marea y factores biológicos espaciales y temporales (Harley et al., 2012). Las diferencias de latitudes cambian las características de los factores mencionados anteriormente y a las corrientes marinas, resultando en una distinta distribución de las macroalgas (Harley et al., 2012). Las ocrofitas aumentan su diversidad hacia regiones frías, los patrones de diversidad de las rodófitas varían entre hemisferios, aumentando de los polos a los trópicos en el hemisferio norte y disminuyendo de los polos a los trópicos en el hemisferio sur; mientras que las clorófitas presentan un patrón menos asociado a la latitud con un leve aumento hacia zonas tropicales (Liuzzi et al., 2011). Por lo que cada macroalga tiene sus requerimientos propios.

La zona intermareal se caracteriza por una abundante presencia de macroalgas; en esta zona el estrés ambiental y las características del sustrato afectan fuertemente la diversidad de macroalgas. Sustratos con mayor rugosidad retienen más humedad, favoreciendo la sobrevivencia de las macroalgas, mientras que sedimentos de grano fino próximos a las rocas limitan el desarrollo de las macroalgas disminuyendo su capacidad fotosintética (Liuzzi et al., 2011). Las especies exóticas, asociadas a actividades antrópicas o la acuicultura (Carlton, 1993), compiten por el espacio y sustrato disponible con las macroalgas nativas generando una disminución en su biodiversidad así mismo de los organismos asociados a estas (Schaffelke y Hewitt, 2007).

COMPOSICIÓN NUTRICIONAL

Las macroalgas (o algas) contienen altas cantidades de carbohidratos (hasta un 60%), cantidades medias/altas de proteínas (10-47%) y bajas cantidades de lípidos (1-3%) con un contenido

variable de cenizas minerales (7- 38%) (Dominguez & Loret, 2019). La tabla 1 y 2 se describe las composiciones generales de los 3 tipos de algas, así como especies específicas.

Tabla 1. Valores nutricionales en promedio de diferentes especies de macroalgas expresado en porcentaje de 100 gramos de alga, donde se muestra proteínas, lípidos, cenizas y fibra dietética sacados de literatura correspondiente.

Alga	Cantidades en %				Referencia
	Proteínas	Lípidos	Cenizas	Fibra dietética	
<i>Gratelopia turuturu</i>	22.9 ± 2.0	2.6 ± 0.1	18.1 ± 0.6	60.4 ± 2.3	(Denis et al., 2010)
<i>Ulva clathrata</i>	20.1 ± 0.1	2.2 ± 0.1	27.5 ± 0.2	40.6	(Peña-Rodríguez et al., 2011)
<i>Ulva lactuca</i>	27.2 ± 1.1	0.3±0.0	11.0±0.1	61.5±0.8	(Ortiz et al., 2006)
<i>Durivillaea antarctica</i>	11.6 ± 0.9	4.3 ± 0.6	25.7 ± 2.5	ND	(Ortiz et al., 2006)
<i>Laminaria saccharina</i>	25.70 ± 0.11	0.79 ± 0.07	34.78 ± 0.08	ND	(Gómez-Ordóñez et al., 2010)
<i>Hizikia fusiforme</i>	10.9 ± 1.0	1.4 ± 0.1	ND	62.3 ± 0.7	(Dawczynski et al., 1998)

%; Cantidades en porcentaje; ND: Es información no disponible.

Las macroalgas marinas son ricas en componentes polisacáridos bioactivos (Délérís et al., 2016), fibras, carotenoides, polifenoles y otros compuestos cruciales en el tratamiento de enfermedades como cardiovasculares, cáncer y diabetes (Quitral R. et al., 2012). Además, contienen antioxidantes potentes y compuestos como ácidos grasos poliinsaturados, aminoácidos, vitaminas y esteroides que promueven tanto la salud humana como el crecimiento vegetal (Al-Saman et al., 2015). Se han identificado también compuestos osmoprotectores que mejoran la respuesta agronómica de los cultivos bajo estrés osmótico. La composición mineral de las algas incluye una amplia gama de macrominerales (Sharma et al., 2014) y microminerales esenciales (Hernández-Herrera et al., 2014).

Tabla 2. Caracterización de los aminoácidos en los 3 tipos de macroalgas según el Filo (Dumay & Morançais, 2016) en el que se expresa en miligramos de aminoácido entre gramos de proteínas de las macroalgas.

	Recomendaciones	Algas pardas			Algas verdes		Algas rojas	
		(9 especies)			(11 especies)		(16 especies)	
		WHO/FAO (2007)	Promedio	Puntuación	Promedio	Puntuación	Promedio	Puntuación
(mg/g Proteínas)	(mg/g Proteínas)		(mg/g Proteínas)		(mg/g Proteínas)			
EAA	His	15	19.8±5.1	ND	23.3±8.3	ND	20.1±9.7	ND
	Ile	30	39.0±8.6	1.4±0.3	38.0±4.5	1.4±0.2	60.6±22.2	21.1±0.8
	Leu	59	69.3±16.2	1.0±0.2	73.6±11.4	1.1±0.2	71.1±11.7	1.1±0.2
	Met	22	18.0±11.0	0.7±0.4	13.1±4.9	0.5±0.2	13.7±8.2	0.6±0.3
	Phe	38	44.6±9.9	1.2±0.3	50.6±10.4	1.4±0.3	50.9±11.5	1.3±0.5
	Thr	23	46.6±8.3	1.4±0.3	51.1±8.3	1.5±0.2	50.3±8.6	1.5±0.2
	Val	39	50.7±9.4	1.4±0.3	63.8±10.7	1.8±0.3	55.3±11.4	1.5±0.4
NEAA	Lys	45	44.2±10.8	0.8±0.2	53.4±14.3	0.9±0.2	60.9±20.9	1.0±0.4
	Asp	ND	103.1±22.9	ND	115.3±27.1	ND	125.4±26.9	ND
	Ser	ND	43.5±12.1	ND	57.5±4.7	ND	47.5±13.8	ND
	Glu	ND	152.6±48.2	ND	116.7±28.1	ND	119.0±36.4	ND
	Pro	ND	39.3±9.2	ND	54.0±15.0	ND	43.4±12.3	ND
	Gly	ND	33.7±26.5	ND	70.9±15.0	ND	61.4±21.4	ND
	Ala	ND	64.4±14.4	ND	87.7±27.3	ND	67.1±12.0	ND
	Cys	ND	21.5±22.2	ND	2.5±4.5	ND	10.4±13.1	ND
	Tyr	ND	21.9±4.9	ND	38.1±33.1	ND	28.4±5.4	ND
	Arg	ND	44.1±8.6	ND	55.8±30.8	ND	56.2±21.8	ND
	[Trp] [A1] [A2]	ND	8.6±4.1	ND	3.0±0.0	ND	12.0±4.4	ND
% EAA	ND	38.9±4.8	ND	38.0±4.0	ND	40.4±4.2	ND	

%: Porcentaje; EAA: Aminoácido esencial; NEAA: Aminoácido no esencial; Puntuación: representa la relación entre la cantidad de cada aminoácido en comparación con la proteína del huevo; ND: Es información no disponible; Ala: Alanina; Arg: Arginina; Cys: Cisteína; His: Histidina; Ile: Isoleucina; Leu: Leucina; Met: Metionina; Phe: Fenilalanina; Thr: Treonina; Val: Valina; Lys: Lisina; Asp: Ácido Aspártico; Glu: Ácido Glutámico; Pro: Prolina; Gly: Glicina; Ser: Serina; Tyr: Tirosina; Trp: Triptofano.

Las macroalgas marinas son ricas en componentes polisacáridos bioactivos (Déléris et al., 2016), fibras, carotenoides, polifenoles y otros compuestos cruciales en el tratamiento de enfermedades como cardiovasculares, cáncer y diabetes (Quitral R. et al., 2012). Además, contienen antioxidantes potentes y compuestos como ácidos grasos poliinsaturados, aminoácidos, vitaminas y esteroides que promueven tanto la salud humana como el crecimiento vegetal (Al-Saman et al., 2015). Se han identificado también compuestos osmoprotectores que mejoran la respuesta agronómica de los cultivos bajo estrés osmótico. La composición mineral de las algas incluye una amplia gama de macrominerales (Sharma et al., 2014) y microminerales esenciales (Hernández-Herrera et al., 2014).

Tabla 2. Caracterización de los aminoácidos en los 3 tipos de macroalgas según el Filo (Dumay & Morançais, 2016) en el que se expresa en miligramos de aminoácido entre gramos de proteínas de las macroalgas.

	Recomendaciones	Algas pardas		Algas verdes		Algas rojas		
		(9 especies)		(11 especies)		(16 especies)		
		WHO/FAO (2007)	Promedio	Puntuación	Promedio	Puntuación	Promedio	Puntuación
	(mg/g Proteínas)	(mg/g Proteínas)		(mg/g Proteínas)		(mg/g Proteínas)		
EAA	His	15	19.8±5.1	ND	23.3±8.3	ND	20.1±9.7	ND
	Ile	30	39.0±8.6	1.4±0.3	38.0±4.5	1.4±0.2	60.6±22.2	21.1±0.8
	Leu	59	69.3±16.2	1.0±0.2	73.6±11.4	1.1±0.2	71.1±11.7	1.1±0.2
	Met	22	18.0±11.0	0.7±0.4	13.1±4.9	0.5±0.2	13.7±8.2	0.6±0.3
	Phe	38	44.6±9.9	1.2±0.3	50.6±10.4	1.4±0.3	50.9±11.5	1.3±0.5
	Thr	23	46.6±8.3	1.4±0.3	51.1±8.3	1.5±0.2	50.3±8.6	1.5±0.2
	Val	39	50.7±9.4	1.4±0.3	63.8±10.7	1.8±0.3	55.3±11.4	1.5±0.4
	Lys	45	44.2±10.8	0.8±0.2	53.4±14.3	0.9±0.2	60.9±20.9	1.0±0.4
NEAA	Asp	ND	103.1±22.9	ND	115.3±27.1	ND	125.4±26.9	ND
	Ser	ND	43.5±12.1	ND	57.5±4.7	ND	47.5±13.8	ND
	Glu	ND	152.6±48.2	ND	116.7±28.1	ND	119.0±36.4	ND
	Pro	ND	39.3±9.2	ND	54.0±15.0	ND	43.4±12.3	ND
	Gly	ND	33.7±26.5	ND	70.9±15.0	ND	61.4±21.4	ND
	Ala	ND	64.4±14.4	ND	87.7±27.3	ND	67.1±12.0	ND
	Cys	ND	21.5±22.2	ND	2.5±4.5	ND	10.4±13.1	ND
	Tyr	ND	21.9±4.9	ND	38.1±33.1	ND	28.4±5.4	ND
	Arg	ND	44.1±8.6	ND	55.8±30.8	ND	56.2±21.8	ND
	[Trp] [A3] [A4]	ND	8.6±4.1	ND	3.0±0.0	ND	12.0±4.4	ND

%	ND	38.9±4.8	ND	38.0±4.0	ND	40.4±4.2	ND
EAA							

%: Porcentaje; EAA: Aminoácido esencial; NEAA: Aminoácido no esencial; Puntuación: representa la relación entre la cantidad de cada aminoácido en comparación con la proteína del huevo; ND: Es información no disponible; Ala: Alanina; Arg: Arginina; Cys: Cisteína; His: Histidina; Lle: Isoleucina; Leu: Leucina; Met: Metionina; Phe: Fenilalanina; Thr: Treonina; Val: Valina; Lys: Lisina; Asp: Ácido Aspártico; Glu: Ácido Glutámico; Pro: Prolina; Gly: Glicina; Ser: Serina; Tyr: Tirosina; Trp: Triptofano.

APLICACIONES AGRONÓMICAS DE LAS MACROALGAS

Se mencionará algunas aplicaciones en investigaciones recientes en donde se utilizan las algas como extractos y harina en cultivos de plantas. Primero se probaron 2 algas en un cultivo de maíz (*Zea mays*) para observar su contenido fitoquímico, el alga *Corallina elongata* incremento el contenido de antioxidantes en la raíz, el ácido tánico en toda la planta y el contenido de polifenoles; al utilizar el alga *Jania rubens* tuvo buenos resultados para la mejora en el contenido de lípidos, nitrógeno y proteínas. Y estas 2 algas al combinarse hicieron que incrementara su contenido en antioxidantes en los brotes y el contenido de azúcar (Al-Saman et al., 2015). También se analizó el efecto que tiene en el suelo y crecimiento de la planta de cilantro (evaluando la longitud y su biomasa seca a los 90 días), pero esta vez utilizando el alga parda *Sargassum vulgare*, al aplica 6 y 9 gramos de harían de esta alga se observó que en suelo hubo más nutrientes y esto hizo que la planta se desarrollará mejor, asimismo a los 35 días se indicó que hubo cambios en el pH y su CE (conductividad eléctrica) (Camurati et al., 2019).

Las algas también se pueden utilizar para la elaboración de composta utilizando desechos orgánicos distribuyéndose de la siguiente manera: 50% de algas (*Cladophora sp* y *Ulva Lactuca*), cantidades iguales de 25% de estiércol de granja y lodo residual. Esta composta ayudo al cultivo desarrollando más a las plantas de maíz y al terminar se analizó el suelo tratado y se observó una mejora en la cantidad de nutrientes, hubo un aumento de humedad, la circulación del aire mejoró y el ambiente hizo que la actividad de microorganismos mejorará (Uribe-Orozco et al., 2018).

De igual manera las algas también se pueden utilizar para la buena germinación de las plantas como en este caso la *Lepidium sativum*, que para su germinación se utilizó composta y extractos de *Fucus sp*. Se evaluó la longitud de esta planta al utilizar composta y extracto para su fertilización, sus resultados fueron buenos, ya que, su crecimiento fue 2 veces mayor en comparación al grupo control (Uribe-Orozco et al., 2018). Asimismo, las algas se pueden utilizar como biofertilizantes gracias a su alto contenido de betainas, compuesto osmilítico orgánico que este ayuda en la protección contra las sales, la sequía y el estrés por temperaturas extremas; para el biofertilizante se utilizaron extractos de las algas *Ascophyllum nodosum*, *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea* y *Fucus serratus* (Blunden et al., 2010).

APLICACIONES EN LA ALIMENTACIÓN HUMANA Y ANIMAL

Alimentación humana

Las algas marinas a sus inicios se cosechaban para elaborar espesantes (alginato, agar y carragenina) y para consumo directo. Hoy en día ya se han realizado varios estudios en donde se han probados que las macroalgas son un alimento muy beneficioso para nuestro cuerpo, ya que, son ricas tanto en proteínas como en vitaminas (en especial las vitaminas A, C y la B12), también proporcionan un buen contenido de lípidos, fibras y minerales (hierro, calcio, yodo, potasio y selenio (Doctoral et al., 2014).

Alimentación animal

En el cultivo de crustáceos (moluscos y peces) las algas marinas son una buena opción para su alimentación, este alimento normalmente viene en forma de pellets, polvo seco o en extractos. Aunque generalmente para hacer este tipo de alimento para los crustáceos se utilizan productos de baja calidad o subproductos del procesamiento de algas. También las macroalgas se utilizan para la alimentación del ganado, pues estas son una buena fuente de proteínas con altos niveles de aminoácidos esenciales, debido a que varios estudios han demostrado que las algas son buenas para la alimentación animal, y algunas de estas pueden ser utilizadas como aditivo alimenticio, para mejorar el crecimiento, en la mejora del metabolismo y para mejorar el estado nutricional de los animales (Camurati et al., 2019).

HERRAMIENTAS BIOINFORMÁTICAS APLICADAS AL ESTUDIO DE LAS MACROALGAS

En la actualidad, se han desarrollado bases de datos especializadas en diversas áreas de las ciencias biológicas, las cuales tienen una amplia variedad de usos, desde la identificación de secuencias de ADN y proteínas hasta el análisis de rutas metabólicas y la evolución de los organismos. Cada una de ellas tiene sus propias características y fortalezas específicas en la investigación biológica. Las bases de datos especializadas ofrecen información valiosa para la investigación biológica. Estas bases de datos incluyen información sobre secuencias de ADN y ARN, estructuras tridimensionales de proteínas y otras macromoléculas biológicas, clasificación taxonómica de los organismos, rutas metabólicas, funciones biológicas, genomas, variaciones genéticas, familias de ARN no codificante conservadas evolutivamente y árboles filogenéticos. Las Bases de Datos más utilizadas incluyen GenBank, UniProtKB, Protein Data Bank (PDB), NCBI Taxonomy, KEGG, Ensembl, Rfam y TreeBASE (De Grado et al., 2023). Estas bases de datos han ayudado a identificar macroalgas de importancia agronómica, así como la salud humana, e identificar extractos o proteínas importantes en las macroalgas gracias al uso de estas herramientas (Tabla 3).

Por otra parte, han existido otras herramientas bioinformáticas que se utilizan en las macroalgas, por ejemplo, el acoplamiento molecular, este se ha convertido en un componente importante del proceso de descubrimiento de fármacos. Desde que se desarrolló por primera vez en la década de 1980, los avances en la potencia del hardware informático y el creciente número y facilidad de acceso a estructuras de proteínas y moléculas pequeñas han contribuido al desarrollo de métodos mejorados, lo que ha hecho que el acoplamiento sea más popular tanto en entornos industriales como académicos. A lo largo de los años, las modalidades mediante las cuales se utiliza el acoplamiento para ayudar en las diferentes tareas del descubrimiento de fármacos han cambiado. Aunque inicialmente se desarrolló y utilizó como método independiente, el acoplamiento ahora se emplea principalmente en combinación con otros enfoques computacionales dentro de flujos de trabajo integrados (Pérez & Tvaroška, 2014). Sin embargo, el acoplamiento molecular también se ha utilizado en las macroalgas para estudiar interacciones proteínas – ligandos de compuestos bioactivos de estas.

Una técnica eficiente para el estudio conjunto de estos compuestos bioactivos son las tecnologías de secuenciación de próxima generación (NGS), estas permiten la generación de información más realista y analizable sobre la diversidad genética de organismos, ya sea a un nivel individual, especie y de taxones superiores. El número de polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) detectados mediante secuenciación de próxima generación es un orden de magnitud superior al de los SNP y/o alelos detectados mediante códigos de barras tradicionales o microsatélites (Fort et al., 2018). En la tabla 3 se tienen algunas aplicaciones bioinformáticas en las macroalgas que han permitido entender más de estas. Gracias a estos se han tenido más información de sus capacidades en agricultura y en muchas otras áreas de estudio.

Tabla 3. Estudios bioinformáticos relacionados con los 3 tipos de macroalgas de diferentes especies utilizando diferentes técnicas (Base de datos, NGS, acoplamiento molecular) en su correspondiente literatura.

Objetivo	Alga	Técnica bioinformática	Referencia
Proceso automatizado de análisis EST (ESTFrontier) de alga roja	<i>Eucheuma denticulatum</i>	Base de datos EuDBase	(Hussein et al., 2011)
Determinación de alérgenos	<i>Rhodophyta</i>	AllergenOnline proporciona coincidencias de identidad de secuencia y una base de datos para la búsqueda y comparación de alérgenos	(Gaspan & Tolentino, 2023)
Evaluar los polisacáridos sulfatados (SSP) de algas bioactivas frente a la proteína objetivo ompF	No especifica	Acoplamiento molecular simulado utilizando AutoDockTools 1.5.6 (ADT)	(Arunkumar et al., 2022)
Identificación emulsionantes derivados de algas, bacterias metanotróficas y proteínas de patata	<i>E. denticulatum</i>	Proteómica cuantitativa	(Yesiltas et al., 2021)
El potencial hipocolesterolémico del alga parda comestible	<i>Fucus vesiculosus</i>	análisis proteómico cuantitativo por PCR	(André et al., 2023)
extracción de ADN preparado para NGS de macroalgas	<i>Ulva spp.</i>	NGS utilizando perlas magnéticas	(Fort et al., 2018)
Interacción alga-microbio	<i>Rhodophyta</i>	Tecnologías NGS	(Patwary et al., 2021)

CONCLUSIONES

Las macroalgas son una fuente de compuestos bioactivos con importantes aplicaciones en la agricultura y en la industria. La investigación entre la biología y la biotecnología, ayudan a entender mejor su ecología, fisiología y potencial comercial, fomentando su conservación y su aprovechamiento sostenible de las macroalgas. En la agricultura las macroalgas juegan un papel valioso, ya que proporcionan fertilizantes orgánicos y bioestimulantes, el cual su uso puede mejorar tanto el crecimiento como la resistencia de los cultivos a enfermedades y condiciones adversas del suelo. Los extractos de macroalgas podrían reemplazar los típicos fertilizantes químicos tradicionales, contribuyendo a la agricultura sostenible y la reducción de la contaminación. En la alimentación, las macroalgas son ricas en nutrientes, incluyendo vitaminas, minerales, proteínas y compuestos bioactivos como los carotenoides. El análisis bioinformático de su composición nutricional y de sus propiedades funcionales puede ayudar a identificar variedades de macroalgas con perfiles nutricionales óptimos para su incorporación en la dieta humana y animal. La bioinformática se puede utilizar en la catalogación de las algas, facilitando tecnologías para la producción y desarrollo de alimentos a base de macroalgas, como lo pueden ser snacks, bebidas, suplementos, productos de panadería, etc. La aplicación de la bioinformática

en el estudio de las macroalgas da paso a nuevas oportunidades para su uso, ya sea en la agricultura y la alimentación, dando soluciones innovadoras, así como sostenibles para mejorar la salud de la humanidad tanto la del medio ambiente.

PERSPECTIVAS A FUTURO Y DESAFÍOS:

Además de su valor como fertilizantes, las macroalgas contienen compuestos bioactivos que promueven el crecimiento de las plantas. Las algas se están estudiando como biostimulantes vegetales para mejorar la resistencia al estrés, la absorción de nutrientes y la calidad de los cultivos. Los géneros más estudiados de algas como bioestimulantes son *Chlorella sorokiana*, *Scenedesmus quadricauda*, algas bálticas, *Chlorella vulgaris* y *Spirulina plantesis*.

Los extractos obtenidos de algas marinas son reconocidos como promotores del crecimiento vegetal. Han sido utilizados tanto en la aplicación foliar como en el sustrato para potenciar el crecimiento de las plantas incluso en condiciones adversas como el frío extremo, la sequía y la salinidad elevada. Además, las plantas tratadas con estos extractos han demostrado una considerable resistencia frente a enfermedades ocasionadas por hongos, bacterias y virus.

Es importante destacar que el uso de macroalgas está en aumento en la industria alimentaria. Dada su capacidad para crecer en entornos diversos y su alto contenido nutricional, las macroalgas se están considerando como una solución para abordar la seguridad alimentaria, especialmente en regiones donde la agricultura tradicional enfrenta desafíos debido a la escasez de agua o suelos degradados.

Declaración de ética: Los autores respaldan el presente trabajo y contribuyendo de manera significativa en su autoría. Así mismo no existe conflicto de interés y se han seguido todos los procedimientos éticos necesarios.

Agradecimientos: Agradecimiento a la Facultad de Agronomía de la UANL por brindarnos fuentes de apoyos económicos y becas, así como la infraestructura y acceso a bases de datos para llevar a cabo la presente revisión.

REFERENCIAS

- Adarshan, S., Sree, V. S. S., Muthuramalingam, P., Nambiar, K. S., Sevanan, M., Satish, L., Venkidasamy, B., Jeelani, P. G., & Shin, H. (2023). Understanding Macroalgae: A Comprehensive Exploration of Nutraceutical, Pharmaceutical, and Omics Dimensions. *Plants* 2024, Vol. 13, Page 113, 13(1), 113. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13010113>
- Al-Saman, M., ... S. F.-I. J. of, & 2015, undefined. (2015). Effects of some red Algae on antioxidant and phytochemical contents of Maize (*Zea mays* L.) plants. *Staff.Usc.Edu.EgMA Al-Saman, SA Farfour, RA HamoudaInternational Journal of Agriculture Sciences, 2015•staff.Usc.Edu.Eg, 5(2), 393–398.* <https://www.staff.usc.edu/uploads/8a002660c432b63c2266f572a8e95b8b.pdf>
- André, R., Pacheco, R., Alves, A. C., Santos, H. M., Bourbon, M., & Serralheiro, M. L. (2023). The Hypocholesterolemic Potential of the Edible Algae *Fucus vesiculosus*: Proteomic and Quantitative PCR Analysis. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/FOODS12142758>
- Arunkumar, M., Mahalakshmi, M., Ashokkumar, V., Aravind, M. K., Gunaseelan, S., Mohankumar, V., Ashokkumar, B., & Varalakshmi, P. (2022). Evaluation of seaweed sulfated polysaccharides as natural antagonists targeting *Salmonella typhi* OmpF: molecular docking and pharmacokinetic profiling. *Beni-Suef University Journal of Basic*

and Applied Sciences, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S43088-021-00192-X/TABLES/2>

- Bañeras, S. B. (2014). *Análisis del sector de producción de algas con fines alimentarios. Percepción del consumidor frente al consumo de algas*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/22271>
- Baweja, P., Kumar, S., Sahoo, D., & Levine, I. (2016). Biology of Seaweeds. *Seaweed in Health and Disease Prevention*, 41–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00003-8>
- Biris-Dorhoi, E. S., Michiu, D., Pop, C. R., Rotar, A. M., Tofana, M., Pop, O. L., Socaci, S. A., & Farcas, A. C. (2020). Macroalgae—A Sustainable Source of Chemical Compounds with Biological Activities. *Nutrients*, 12(10), 1–23. <https://doi.org/10.3390/NU12103085>
- Blunden, G., Morse, P. F., Mathe, I., Hohmann, J., Critchley, A. T., & Morrell, S. (2010). Betaine yields from marine algal species utilized in the preparation of seaweed extracts used in agriculture. *Natural Product Communications*, 5(4), 581–585. <https://doi.org/10.1177/1934578X1000500418>
- Camurati, J. R., Hocsman, J., & Salomone, V. N. (2019). Potentialities of Argentine marine macroalgae. *Marine and Fishery Sciences (MAFIS)*, 32(2), 169–183. <https://doi.org/10.47193/MAFIS.3222019121907>
- Dawczynski, C., Schubert, R., chemistry, G. J.-F., & 2007, undefined. (1998). Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products. *ElsevierC Dawczynski, R Schubert, G JahreisFood Chemistry, 2007•Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.041>
- De, D., Marina, B., De, E., Actividad, L. A., & De, A. (2015). *EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA DE Ulva lactuca*. <https://biblio.uabcs.mx/tesis/te3372.pdf>
- De Grado, T., Optar, P., Título De Magíster En, A. L., Maestría, B., & Biotecnología, E. N. (2023). *La bioinformática como herramienta para el conocimiento de microorganismos edáficos con potencial para la producción agrícola sostenible, recuperación y*. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/28824>
- Déléris, P., Nazih, H., & Bard, J. M. (2016). Seaweeds in Human Health. *Seaweed in Health and Disease Prevention*, 319–367. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00010-5>
- Denis, C., Morançais, M., Li, M., Deniaud, E., Gaudin, P., Wielgosz-Collin, G., Barnathan, G., Jaouen, P., & Fleurence, J. (2010). Study of the chemical composition of edible red macroalgae *Grateloupia turuturu* from Brittany (France). *Food Chemistry*, 119(3), 913–917. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.07.047>
- Doctoral, T., Lucas, A. :, Directora, M., Alicia, D., Califano Co-Directora, N., Silvina, D., & Andrés, C. (2014). *Alternativas tecnológicas para el desarrollo de productos cárnicos emulsionados saludables*. <https://doi.org/10.35537/10915/34958>
- Dominguez, H., & Loret, E. P. (2019). *Ulva lactuca*, A Source of Troubles and Potential Riches. *Marine Drugs 2019, Vol. 17, Page 357, 17(6)*, 357. <https://doi.org/10.3390/MD17060357>
- Dumay, J., & Morançais, M. (2016). Proteins and Pigments. *Seaweed in Health and Disease Prevention*, 275–318. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802772-1.00009-9>
- Fort, A., Guiry, M. D., & Sulpice, R. (2018). Magnetic beads, a particularly effective novel method for extraction of NGS-ready DNA from macroalgae. *Algal Research*, 32, 308–313. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2018.04.015>

- Gaspan, D., & Tolentino, M. (2023). Identificación y caracterización in silico de posibles alérgenos de algas rojas. *Revista Abierta de Bioinformática y.* <https://www.biolscigroup.us/articles/OJBB-7-113.php>
- Gómez-Ordóñez, E., Jiménez-Escrig, A., & Rupérez, P. (2010). Dietary fibre and physicochemical properties of several edible seaweeds from the northwestern Spanish coast. *Food Research International*, 43(9), 2289–2294. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2010.08.005>
- Gupta, S., & Abu-Ghannam, N. (2011). Desarrollos recientes en la aplicación de algas o extractos de algas como medio para mejorar la seguridad y los atributos de calidad de los alimentos. *Ciencia de Los Alimentos Innovadora y Emergente...* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466856411001007>
- Harley, C. D. G., Anderson, K. M., Demes, K. W., Jorve, J. P., Kordas, R. L., Coyle, T. A., & Graham, M. H. (2012). Effects Of Climate Change On Global Seaweed Communities. *Journal of Phycology*, 48(5), 1064–1078. <https://doi.org/10.1111/J.1529-8817.2012.01224.X>
- Hernández-Herrera, R. M., Santacruz-Ruvalcaba, F., Ruiz-López, M. A., Norrie, J., & Hernández-Carmona, G. (2014). Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Applied Phycology*, 26(1), 619–628. <https://doi.org/10.1007/S10811-013-0078-4/FIGURES/4>
- Hussein, Z. A. M., Loke, K. K., Abidin, R. A. Z., & Othman, R. (2011). EuDBase: An online resource for automated EST analysis pipeline (ESTFrontier) and database for red seaweed *Eucheuma denticulatum*. *Bioinformation*, 7(4), 157. <https://doi.org/10.6026/97320630007157>
- Liuzzi, M. G., Gappa, J. L., & Piriz, M. L. (2011). Latitudinal gradients in macroalgal biodiversity in the Southwest Atlantic between 36 and 55°S. *Hydrobiologia*, 673(1), 205–214. <https://doi.org/10.1007/S10750-011-0780-7>
- Makkar, H. P. S., Tran, G., Heuzé, V., Giger-Reverdin, S., Lessire, M., Lebas, F., & Ankers, P. (2016). Seaweeds for livestock diets: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 212, 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2015.09.018>
- Mansilla, A., Oceanografía, K. A.-B. M. y, & 2013, undefined. (n.d.). CAPITULO 16. GENERALIDADES SOBRE LAS MACROALGAS. *Recursosbiblio.Url.Edu.GtA Mansilla, K AlvealBiología Marina y Oceanografía, México, 2013*•*recursosbiblio.Url.Edu.Gt*. Retrieved May 13, 2024, from <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/BioMarina/12.pdf>
- Manual de practicas de laboratorio biologia de algas - Google Académico*. (n.d.). Retrieved May 28, 2024, from https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Manual+de+practic+de+laboratorio+biologia+de+algas&btnG=
- Morais, T., Inácio, A., Coutinho, T., Ministro, M., Cotas, J., Pereira, L., & Bahcevandziev, K. (2020). Seaweed Potential in the Animal Feed: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering 2020, Vol. 8, Page 559*, 8(8), 559. <https://doi.org/10.3390/JMSE8080559>
- Moreda-Piñeiro, J., Moreda-Piñeiro, A., & Romarís-Hortas, V. (2012). Metales traza en alimentos marinos: estimación de la biodisponibilidad y efecto de los principales componentes de

los alimentos. *Química de Los Alimentos*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814612003809>

- Ortiz, J., Romero, N., Robert, P., Araya, J., Lopez-Hernández, J., Bozzo, C., Navarrete, E., Osorio, A., & Rios, A. (2006). Dietary fiber, amino acid, fatty acid and tocopherol contents of the edible seaweeds *Ulva lactuca* and *Durvillaea antarctica*. *Food Chemistry*, 99(1), 98–104. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.07.027>
- Patwary, Z. P., Paul, N. A., Nishitsuji, K., Campbell, A. H., Shoguchi, E., Zhao, M., & Cummins, S. F. (2021). Application of omics research in seaweeds with a focus on red seaweeds. *Briefings in Functional Genomics*, 20(3), 148–161. <https://doi.org/10.1093/BFGP/ELAB023>
- Peña-Rodríguez, A., Mawhinney, T. P., Ricque-Marie, D., & Cruz-Suárez, L. E. (2011). Chemical composition of cultivated seaweed *Ulva clathrata* (Roth) C. Agardh. *Food Chemistry*, 129(2), 491–498. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.04.104>
- Pérez, S., & Tvaroška, I. (2014). Carbohydrate-protein interactions: Molecular modeling insights. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, 71, 9–136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800128-8.00001-7>
- Peteiro, C., Cortés, B., ... N. A.-C. O., & 2016, undefined. (n.d.). Creación de bancos de germoplasma o “semillas” con algas laminarias para su conservación, restauración ecológica y/o cultivo comercial. *Digital.Csic.EsC Peteiro, B Cortés, NL Arroyo, M García-Tasende, A Vergés, B MartínezCentro Oceanográfico de Santander, 2016•digital.Csic.Es*. Retrieved May 28, 2024, from https://digital.csic.es/bitstream/10261/314162/4/IPAC_Peteiro.pdf
- Quitral R., V., Morales G., C., Sepúlveda L., M., & Schwartz M., M. (2012). Propiedades nutritivas y saludables de algas marinas y su potencialidad como ingrediente funcional. *Revista Chilena de Nutrición*, 39(4), 196–202. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182012000400014>
- Ribamar Da Cruz, J., Júnior, F., & Ribamar Da Cruz, F. J. (2015). *Desarrollo y aplicaciones del cultivo de "Saccharina latissima"(Laminariales, Ochrophyta) en sistemas de acuicultura multitrófica integrada (MTI)*. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/15444>
- Sharma, H. S. S., Fleming, C., Selby, C., Rao, J. R., & Martin, T. (2014). Plant biostimulants: A review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology*, 26(1), 465–490. <https://doi.org/10.1007/S10811-013-0101-9/TABLES/3>
- Uribe-Orozco, M., (Arica), L. M.-C.-I., & 2018, undefined. (n.d.). Efecto del alga marina *Sargassum vulgare* C. Agardh en suelo y el desarrollo de plantas de cilantro. *SciELO Chile*. Retrieved May 14, 2024, from https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292018005001202&script=sci_arttext
- Yesiltas, B., Gregersen, S., Lægsgaard, L., Brinch, M. L., Olsen, T. H., Marcatili, P., Overgaard, M. T., Hansen, E. B., Jacobsen, C., & García-Moreno, P. J. (2021). Emulsifier peptides derived from seaweed, methanotrophic bacteria, and potato proteins identified by quantitative proteomics and bioinformatics. *Food Chemistry*, 362, 130217. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.130217>

Betalainas: pigmentos de la fruta del dragón para colorear tus alimentos **Betalains: pigments from the dragon fruit for coloring your food**

Martínez-Ramos, A. R.¹, Abadía-García, L.¹, Cardador-Martínez, A.², Amaya-Llano, S. L.*

¹Facultad de Química, Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas s/n, Las Campanas, C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Qro.

*samayal@uaq.mx.

²Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
Epigmenio Gonzáles 500, Fraccionamiento San Pablo, C.P. 76130, Santiago de Querétaro, Qro.

RESUMEN

El color es uno de los atributos sensoriales más importantes de un alimento y para conservar esta cualidad, en la industria se utilizan colorantes sintéticos que se han asociado con el desarrollo de ciertas enfermedades por lo que, existe un interés creciente por desarrollar colorantes de origen natural como lo son las betalainas, pigmentos que se encuentran en la pulpa y en la cáscara de la fruta del dragón, una fruta nativa de México que se ha popularizado a nivel mundial gracias a su alto valor nutricional y gran contenido de compuestos bioactivos. Esta revisión aborda de manera general los colorantes que se utilizan en la industria de alimentos. Posteriormente presenta el caso de las betalainas como colorante natural y a la fruta del dragón como fuente de obtención de estos compuestos. Finalmente, de forma breve, la extracción de estos pigmentos a partir de la fruta del dragón como alternativa para su uso como colorante comercial.

Palabras clave: betalainas, fruto del dragón, colorante natural, pigmentos, aprovechamiento de subproductos agroindustriales.

ABSTRACT

Color is one of the most important sensory attributes of foods and to preserve this quality, the industry uses synthetic dyes that have been associated with the development of certain diseases, which is why there is a growing interest in developing dyes of natural origin. such as betalains, pigments found in the pulp and peel of dragon fruit, a fruit native from Mexico that has become popular worldwide thanks to its high nutritional value and high content of bioactive compounds. This review generally addresses the colorants used in the food industry. Subsequently, it presents the case of betalains as a natural dye and dragon fruit as a source of obtaining these compounds. Finally, briefly, the extraction of these pigments from dragon fruit as an alternative for its use as a commercial dye.

Keywords: betalains, dragon fruit, natural dye, pigments, use of agroindustrial byproduct

1. Coloreando los alimentos con aditivos

A lo largo de los años, los avances tecnológicos en alimentos han permitido proporcionar al consumidor productos asequibles, nutritivos, ricos y seguros. Los aditivos desempeñan un papel crucial y su uso es fundamental para reducir la pérdida de los alimentos, extender su vida de anaquel y desarrollar nuevas formulaciones cumpliendo así con las demandas del mercado (Novais *et al.*, 2022). Éstos son sustancias que se añaden a los alimentos para conservar o mejorar ciertas cualidades, entre ellas el color, una de las características más valoradas cuando los consumidores evalúan un producto alimenticio. El color es un parámetro sensorial relacionado con otros parámetros como el aroma, el sabor, o la textura y nos proporciona una percepción del estado, composición y calidad del alimento, por lo que influye de manera crucial a la hora de aceptar o rechazar un producto. Es por esto que no sólo los consumidores, si no la industria alimentaria busca tecnologías que garanticen un color estable durante la producción, distribución y almacenamiento de los alimentos, de manera que se garantice la calidad del producto esperada por los consumidores (Molina *et al.*, 2023).

Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Los colorantes alimentarios pueden clasificarse de acuerdo a su origen en naturales o sintéticos, orgánicos e inorgánicos (Novais *et al.*, 2022). Desde la antigüedad, los romanos y egipcios utilizaron colorantes inorgánicos naturales para mejorar la apariencia de los alimentos; sin embargo, la ciencia y el desarrollo de tecnología en alimentos permitió la obtención de colorantes tanto naturales como sintéticos, orgánicos e inorgánicos (Fig. 1) (Molina *et al.*, 2023).

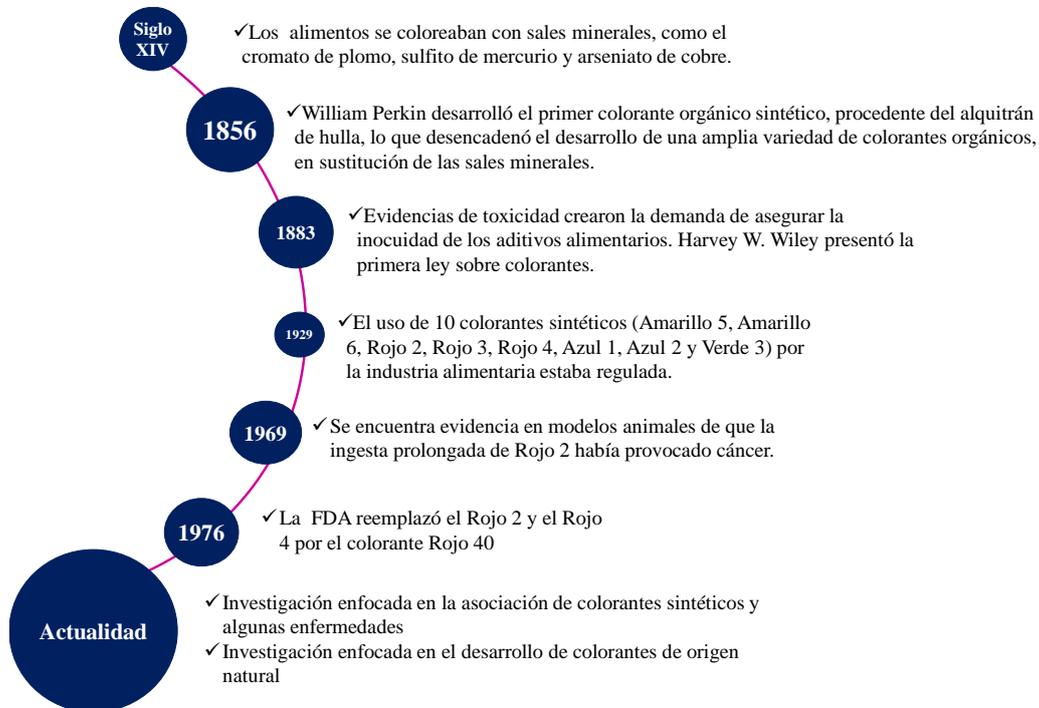


Fig. 1. Acontecimientos relevantes en la historia de los colorantes alimentarios (Molina *et al.*, 2023; Renita *et al.*, 2023).

2. Colorantes sintéticos, un riesgo para la salud si se consumen en exceso.

Entre los colorantes naturales y los sintéticos, actualmente los más utilizados son los sintéticos, aquellos que se obtienen mediante síntesis química y no se encuentran en la naturaleza (Novais *et al.*, 2022). Los compuestos azoicos son la categoría de colorantes sintéticos producidos en mayor cantidad y su popularidad se basa en su versatilidad química, lo que da como resultado una gran cantidad de colores vibrantes que son de bajo costo, fácil acceso y estables. Sin embargo, los colorantes sintéticos tienen la gran desventaja de provocar efectos adversos para la salud (Barciela *et al.*, 2023). Epidemiológicamente se estima que la prevalencia de alergias relacionadas con colorantes en adultos es inferior al 1 %; mientras que, en niños es del 2 % (Weisbrod *et al.*, 2023). En adición, el aumento en el uso de colorantes alimentarios sintéticos durante los últimos 40 años coincide con el aumento del cáncer colorrectal de aparición temprana y dado que los alimentos ultraprocesados que lo contienen, son particularmente atractivos para los niños, existe una preocupación creciente sobre el impacto de estos colorantes en el desarrollo de este tipo de cáncer. Recientemente investigadores de la Universidad de Carolina del Sur en Estados Unidos, mostraron que, en particular el Rojo 40, daña el ADN, causa disbiosis (desequilibrio en el tipo y/o número de colonias microbianas pertenecientes a una microbiota intestinal sana) e induce una respuesta inflamatoria de bajo grado en el colon y en el recto. Esta inflamación crónica puede contribuir al desarrollo de cáncer de colon (Zhang *et al.*, 2023). El Rojo 40 (E129, Rojo Allura AC, Rojo 17) es el colorante rojo más utilizado en nuestro país en alimentos como yogur, gelatina, postres, helado, dulces, mermeladas, cereales, refrescos, salsas, snacks, cárnicos y productos de panadería (Renita *et al.*, 2023).

Además del Rojo 40, el Rojo 7 (Ponceau 4R o Rojo Cochinilla), el Amarillo ocaso (Amarillo 6, Amarillo Ácido 17 o Amarillo Crepúsculo) y la Tartracina (Amarillo 5, TZ, Amarillo Ácido 23 o Amarillo Alimentario 4), son los más utilizados en alimentos tales como refrescos, néctares y jugos, caramelos, gelatinas, mermeladas, salsas, galletas y snacks entre otros y cubren el 65% del mercado de los colorantes comerciales (Fig. 2). Si se consumen en exceso se han reportado hipersensibilidad, alergias, esclerosis múltiple, intolerancia alimentaria, falta de atención, enfermedades cardíacas, asma, náuseas, daño cerebral, toxicidad reproductiva, neurotoxicidad y dolor de cabeza (Renita *et al.*, 2023).



Fig. 2. Los colorantes orgánicos sintéticos más utilizados en la industria de alimentos. Rojo 40, Rojo 7, Tartracina y Amarillo Ocaso (Renita *et al.*, 2023).

Cabe destacar que los alimentos procesados deben contener como máximo la dosis de Ingestión Diaria Admisible (IDA), que es una estimación sobre la cantidad de aditivo alimentario en relación con el peso corporal que una persona puede ingerir diariamente durante toda la vida sin riesgo apreciable para su salud. Esta estimación fue efectuada por el Comité Mixto de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y los expertos en aditivos alimentarios de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés). En el caso del Rojo 40 esta dosis va de los 25 mg/kg en carnes hasta los 500 mg/kg en alimentos preparados a base de cereales o semillas; para el Rojo 7 las dosis van de los 50 mg/kg en dulces, helados y productos de panificación hasta los 500 mg/kg en carnes; asimismo, para el Amarillo Ocaso van de los 12 mg/kg en productos lácteos hasta los 500 mg/kg en carnes y finalmente para la Tartracina van de los 30 mg/kg para productos procesados de la pesca hasta los 600 mg/kg para tortillas de maíz nixtamalizado y tostadas (DOF, 2012). Como consumidores podemos conocer si los productos que consumimos contienen estos colorantes al revisar los ingredientes de la etiqueta; sin embargo, no podemos conocer la dosis, y por lo regular los efectos adversos para la salud aparecen al superar la dosis de IDA.

3. Colorantes naturales en alimentos, una alternativa para cuidar la nuestra salud

Como consecuencia, actualmente varias investigaciones se encuentran enfocadas en el desarrollo de colorantes naturales que además de pigmentar, poseen diversas propiedades biológicas que pueden contribuir a retrasar o evitar enfermedades. Además, los colorantes naturales ofrecen una mayor sostenibilidad ambiental pueden ser extraídos de residuos agroindustriales (ej. cáscaras de frutas en la producción de jugos) y poseen otras funciones tecnológicas como la conservación, lo cual resulta una característica de gran interés en un aditivo (Barciela *et al.*, 2023).

Estos colorantes se pueden extraer de plantas, animales, microorganismos o sustancias minerales y se pueden clasificar en tres grupos principales de acuerdo a su estructura química: el primero se compone de flavonoides siendo las antocianinas las más conocidas, estas se encuentran exclusivamente en frutas y verduras. El segundo grupo incluye las clorofilas, y están presentes principalmente en verduras (hojas, flores y tallos). El tercer grupo representa compuestos carotenoides que se encuentran principalmente en vegetales, algas y bacterias. Además de estos tres, existen también la curcumina procedente de la cúrcuma (*Curcuma longa L.*) y las ficocianinas que se encuentran en la espirulina, un alga unicelular (Carreón-Hidalgo *et al.*, 2022; Molina *et al.*, 2023). Finalmente, las betalaínas, que se encuentran en frutos, flores y raíces como el betabel. En la Fig. 3 se muestran estos compuestos, los tonos que proporcionan como colorantes y las fuentes naturales en donde se encuentran.

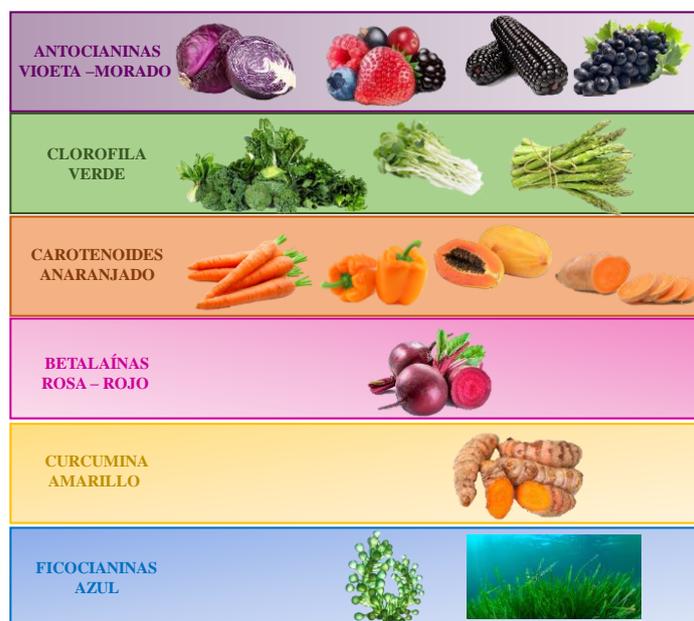


Fig. 3. Compuestos colorantes y fuentes naturales en donde se encuentran (Santos & Bicas *et al.*, 2021; Carreón-Hidalgo *et al.*, 2022; Molina *et al.*, 2023).

4. Betalaínas como colorante natural

Las betalaínas han cobrado gran interés para su uso como colorante ya que proporcionan una gama de tonos que van del amarillo al rosa, rojo y morado, y se mantienen estables en un pH de 3 a 7, lo que les da ventaja sobre las antocianinas que pierden su estabilidad en un pH mayor a 3. Esto significa que las betalaínas son adecuadas para utilizarse en una gama más amplia de productos alimenticios (Tanaka *et al.*, 2008; Esatbeyoglu *et al.*, 2015).

Las betalaínas son compuestos sintetizados en ciertas especies de plantas pertenecientes al orden *Caryophyllales*, entre estas se encuentran el betabel, el amaranto, la bouganvilia y las cactáceas como la tuna, el garambullo, la pitaya y la fruta del dragón (Fig. 4) (Naqvi & Husnain, 2020). Estos compuestos actúan en la planta protegiéndola de los rayos UV y participan en la polinización y dispersión de las semillas, al atraer aves e insectos (Tanaka *et al.*, 2008).



Fig. 4. Especies vegetales en donde se encuentran las betalainas

Las betalainas, además de ser responsables de una amplia gama de tonalidades han mostrado tener propiedades antimicrobianas, anticancerígenas, antioxidantes y antivirales (Molina *et al.*, 2023). Estudios en líneas celulares y en modelos animales, han reportado que las betalainas actúan contra el estrés oxidativo y varios tipos de cáncer. También, se ha demostrado mediante estudios clínicos y en animales, su efecto antiinflamatorio, la mejora de la función cognitiva y su efecto contra la demencia y el Alzheimer (Hadipour *et al.*, 2020; Naqvi & Husnain, 2020). A pesar de esto, es importante enfatizar que las concentraciones de betalainas utilizadas para lograr estos beneficios son más altas que las utilizadas con fines colorantes (Martins *et al.*, 2017).

Es por esto que, en años recientes ha despertado el interés por fuentes de extracción de betalainas, especialmente las cactáceas, las cuales se pueden cultivar fácilmente en zonas áridas o secas a bajo costo y, además, podrían utilizarse como alimento para rumiantes incluso después de la extracción de los pigmentos (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021). Recientemente una de las más populares para su consumo a nivel mundial, es la fruta del dragón.

5. Fruta del dragón o pitahaya

La fruta del dragón o pitahaya, es la fruta de diferentes especies del género *Hylocereus* de la familia *Cactaceae*. Las más populares son las de cáscara rosada y pulpa blanca y la de cáscara rosada y pulpa rosa, roja o morada. La planta crece sobre otro vegetal o tutor como soporte y sus tallos tienen forma triangular, son turgentes, y de color verde (Fig. 5) (Luo *et al.*, 2014; Verona-Ruíz *et al.*, 2020).

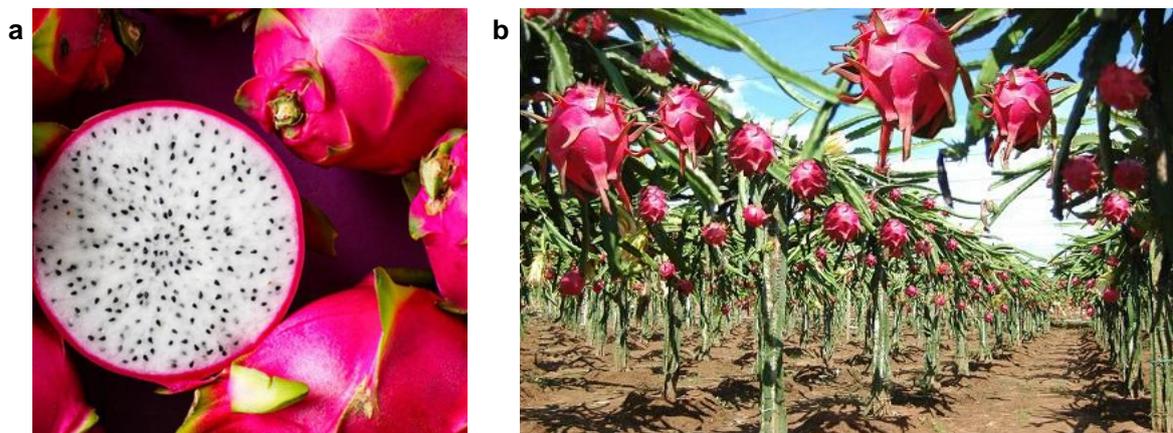


Fig. 5. Fruta del dragón. a: cáscara rosada y pulpa blanca; b: cultivo comercial.

La pitahaya es una especie nativa de México, incluso se ha mencionado en documentos históricos como una fruta popular entre los aztecas (Kim *et al.*, 2011). Aunque esta planta es originaria de

América, actualmente los principales productores a nivel mundial son China, Malasia y Vietnam; mientras que, a nivel nacional los principales productores son Yucatán y Quintana Roo. A pesar de que en México la producción comercial de pitahaya es relativamente baja, esta planta se encuentra de manera silvestre en Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Jalisco, Colima, Michoacán, Puebla, Estado de México, Veracruz, Oaxaca y Tabasco (Montesinos-Cruz *et al.*, 2015).

La pitahaya se ha popularizado debido a su alto valor nutricional que incluye fibra dietaria, proteína y ácidos grasos insaturados como el oleico (Omega 9) y el linoleico (Omega 6), varias vitaminas y minerales necesarios para una adecuada alimentación, y compuestos bioactivos, a los cuales se atribuye su alta capacidad antioxidante y beneficios para la salud humana (

Tab. 1) (Jiang *et al.*, 2021; Lin *et al.*, 2022; Verona-Ruíz *et al.*, 2020).

Tab. 1. Composición nutrimental y fitoquímica de la fruta del dragón.

<i>Nutriente</i>	<i>Concentración</i>	<i>Referencias</i>
Contenido de humedad (g/ 100 g)	84.30 - 89	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Proteína (g/100 g)	0.50 - 2.27	
Grasa (g/100 g)	0.00 - 0.40	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Attar <i>et al.</i> , 2022
Ácido palmítico (mg/100 g)	62.74	Attar <i>et al.</i> , 2022
Ácido oleico (mg/100 g)	107.04	
Ácido linoleico (mg/100 g)	252.65	
Ácido esteárico (mg/100 g)	27.33	
Carbohidratos (%)	6.26 - 11.00	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Fibra dietaria (%)	0.70 - 3.00	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Cenizas (%)	0.54 - 0.79	Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Calcio mg/100 g	0.04 - 45.70	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Hierro mg/100 g	0.00 - 155	
Fosforo mg/100 g	0.003 - 29.90	
Potasio mg/100 g	3.09 - 193	Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022
Magnesio mg/100 g	0.00 - 45.70	

<i>Manganeso mg/100 g</i>	0.108 - 2.23	
<i>Vitamina B1 (tiamina) mg/100 g</i>	0.0022 - 0.04	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021
<i>Viamina B2 (riboflavina) mg/100 g</i>	0.0019 - 0.05	
<i>Vitamina B3 (niacina) mg/100 g</i>	0.16 - 0.20	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Mercado-Silva <i>et al.</i> , 2018
<i>Vitamina B5 (ácido pantoténico) mg/100 g</i>	0.045 - 0.049	Arivalagan <i>et al.</i> , 2021
<i>Vitamina C mg/100 g</i>	4.71 - 20.5	Elmarzugi <i>et al.</i> , 2016; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021
<i>Vitamina E mg/100 g</i>	0.075 - 0.10	Arivalagan <i>et al.</i> , 2021
<i>Vitamina K1 mg/100 g</i>	0.030 - 0.10	
<i>Flavonoides totales (mg/100 g)</i>	1.50 – 352.00	Kim <i>et al.</i> , 2011; Suh <i>et al.</i> , 2014; Arivalagan <i>et al.</i> , 2021; Paško <i>et al.</i> , 2021; Attar <i>et al.</i> , 2022; Salam <i>et al.</i> , 2022)
<i>Polifenoles totales (mg/100 g)</i>	2.80 – 300.00	
<i>Betalainas totales (mg/100 g)</i>	5.00 – 5.33	Suh <i>et al.</i> , 2014; Paško <i>et al.</i> , 2021

En adición, se ha reportado que la cáscara de la pitahaya representa entre el 20 y 40% del peso total del fruto y es una alternativa para la recuperación de estos compuestos, a través del proceso de extracción (Mercado-Silva *et al.*, 2018). Dado que los residuos de la industria alimentaria (cáscaras, semillas, tallos, bagazo) representan aproximadamente 190 millones de toneladas por año a escala global, la cáscara de pitahaya está siendo investigada, no sólo por razones económicas y de salud, sino también por razones medioambientales (Carillo *et al.*, 2022).

6. Las betalainas de la fruta del dragón como un colorante natural

A pesar de los colores y las propiedades antiinflamatorias, antimicrobianas, anticancerígenas, antioxidantes y antivirales que las betalainas poseen, estas tienen la desventaja de ser más costosas y además, inestables a diferentes factores como la temperatura, el pH y la luz, es decir que se degradan y pierden su color. Es por esto que realizamos investigación relacionada no sólo con la extracción de estas moléculas, sino también con el estudio y mejoramiento de su estabilidad.

Existen diferentes maneras de obtener los pigmentos que se encuentran en fuentes naturales para ser utilizados como colorantes en la industria de alimentos, una de ellas es mediante el proceso de extracción. La extracción con disolventes es la técnica que utilizamos para separar un compuesto (ej. betalainas), de una mezcla sólida o líquida (ej. cáscara de la fruta del dragón), aprovechando las diferencias de solubilidad de los componentes de la mezcla en el disolvente. En la extracción de betalainas de la fruta del dragón, influyen factores como el tiempo y temperatura del proceso, el tipo de disolvente (agua, etanol o mezclas de ambos) y la preparación de la muestra vegetal (ej. deshidratar la cáscara antes de la extracción) (Carreón-Hidalgo *et al.*, 2022). En general, la extracción de moléculas a partir de fuentes vegetales comúnmente se caracteriza por un bajo rendimiento de extracción, es por esto que investigamos y aplicamos nuevas tecnologías capaces de mejorar este proceso.

Una vez extraídas las betalainas, para mantener su estabilidad, se aplican algunas tecnologías como la encapsulación, que es un proceso que consiste en el recubrimiento del pigmento con materiales de grado alimenticio como maltodextrina, pectina, proteínas y gomas. Esta tecnología implica mezclar el pigmento y el material de recubrimiento y alimentar un equipo de secado por aspersión con el cual la mezcla se atomiza a través de una boquilla y el agua que contiene se evapora con un flujo de aire caliente, lo que finalmente produce microcápsulas, que percibimos como el colorante en polvo (Carreón-Hidalgo et al., 2022).

Actualmente, las betalainas son utilizadas de manera comercial no sólo en la industria alimentaria sino también en la farmacéutica y cosmética. Este colorante natural se conoce como Rojo Remolacha, Rojo Betabel o Rojo E162 y su uso se encuentra regulado en México, Estados Unidos y en Europa. La fuente de obtención es el betabel (*B. vulgaris*), el cual ha sido considerado durante mucho tiempo como la única fuente de betalainas; sin embargo, el betabel, presenta ciertos inconvenientes tales como el arrastre de microorganismos del suelo que conducen a la contaminación, un sabor y/o aroma terroso adverso y una baja gama de tonalidades (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2021; Carreón-Hidalgo et al., 2022). Es por esto que estudiamos a la cáscara de la fruta del dragón como una fuente alternativa para la recuperación de betalainas, el mejoramiento del rendimiento en los procesos de extracción y la preservación de la estabilidad de estos pigmentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Arivalagan, M., Karunakaran, G., Roy, T. K., Dinsha, M., Sindhu, B. C., Shilpashree, V. M., Satisha, G. C., & Shivashankara, K. S. (2021). Biochemical and nutritional characterization of dragon fruit (*Hylocereus* species). *Food chemistry*, 353(129426). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129426>
- Attar, Ş. H., Gündeşli, M. A., Urün, I., Kafkas, S., Kafkas, N. E., Ercisli, S., Ge, C., Mlcek, J., & Adamkova, A. (2022). Nutritional analysis of red-purple and white-fleshed pitaya (*Hylocereus* species). *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(3), 808. <https://doi.org/10.3390/molecules27030808>
- Barciela, P., Perez-Vazquez, A., & Prieto, M. A. (2023). Azo dyes in the food industry: Features, classification, toxicity, alternatives, and regulation. *Food and chemical toxicology*, 178, 113935. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113935>
- Carreón-Hidalgo, J. P., Franco-Vásquez, D. C., Gómez-Linton, D. R., & Pérez-Flores, L. J. (2022). Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. *Food research international* (Ottawa, Ont.), 151, 110821. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110821>
- Diario Oficial de la Federación. (2012). ACUERDO por el que se determinan los aditivos y coadyuvantes en alimentos, bebidas y suplementos alimenticios, su uso y disposiciones sanitarias.
- Elmarzugi, N. A., Cheah, L., Eid, A., Aziz, A., & Ariffin, F. (2016). Phytochemical properties and health benefits of *Hylocereus undatus*. *Nanomedicine & nanotechnology*, 1(1), 1-10.
- Hadipour, E., Taleghani, A., Tayarani-Najaran, N., & Tayarani-Najaran, Z. (2020). Biological effects of red beetroot and betalains: A review. *Phytotherapy research: PTR*, 34 (8), 1847–1867. <https://doi.org/10.1002/ptr.6653>
- Jiang, H., Zhang, W., Li, X., Shu, C., Jiang, W., & Cao, J. (2021). Nutrition, phytochemical profile, bioactivities and applications in food industry of pitaya (*Hylocereus* spp.) peels: A comprehensive review. *Trends in food science & technology*. 116, 199–217. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.040>
- Kim, H., Choi, H. K., Moon, J. Y., Kim, Y. S., Mosaddik, A., & Cho, S. K. (2011). Comparative antioxidant and antiproliferative activities of red and white pitayas and their correlation with flavonoid and polyphenol content. *Journal of food science*, 76(1), 38–45. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01908.x>

- Lin, X., Li, B., Wen, J., Wu, J., Tang, D., Yu, Y., Xu, Y., & Xu, B. (2022). Storage stability and *in vitro* bioaccessibility of liposomal betacyanins from red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*). *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(4), 1193. <https://doi.org/10.3390/molecules27041193>
- Luo, H., Cai, Y., Peng, Z., Liu, T., & Yang, S. (2014). Chemical composition and *in vitro* evaluation of the cytotoxic and antioxidant activities of supercritical carbon dioxide extracts of pitaya (dragon fruit) peel. *Chemistry central journal*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-8-1>
- Martins, N., Roriz, C. L., Morales, P., Barros, L., & Ferreira, I. C. F. R. (2017). Coloring attributes of betalains: a key emphasis on stability and future applications. *Food & function*, 8(4), 1357–1372. <https://doi.org/10.1039/c7fo00144d>
- Mercado-Silva, E. M. (2018). Pitaya— *Hylocereus undatus* (Haw). In S. Rodrigues, E. Silva & E. Brito (Eds.), *Exotic fruits reference guide* (pp. 339–349). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00045-9>
- Molina, A. K., Corrêa, R. C. G., Prieto, M. A., Pereira, C., & Barros, L. (2023). Bioactive natural pigments extraction, isolation, and stability in food applications. *Molecules* (Basel, Switzerland), 28(3), 1200. <https://doi.org/10.3390/molecules28031200>
- Montesinos-Cruz, J. A., Rodríguez-Larramendi, L., Ortiz-Pérez, R., Fonseca-Flores, M. Á., Ruíz-Herrera, G., Guevara-Hernández, F. (2015). Pitahaya (*Hylocereus spp.*) un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano. *Cultivos tropicales*, 36, 67-76.
- Naqvi, S. F. H., & Husnain, M. (2020). Betalains: potential drugs with versatile phytochemistry. *Critical reviews in eukaryotic gene expression*, 30(2), 169–189. <https://doi.org/10.1615/CritRevEukaryotGeneExpr.2020030231>
- Novais, C., Molina, A. K., Abreu, R. M. V., Santo-Buelga, C., Ferreira, I. C. F. R., Pereira, C., & Barros, L. (2022). Natural food colorants and preservatives: A review, a demand, and a challenge. *Journal of agricultural and food chemistry*, 70(9), 2789–2805. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07533>
- Paško, P., Galanty, A., Zagrodzki, P., Ku, Y. G., Luksirikul P., Weisz M., & Gorinstein S. (2021). Bioactivity and cytotoxicity of different species of pitaya fruits – A comparative study with advanced chemometric analysis. *Food bioscience*, 40(100888), 2212-4292. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100888>
- Renita, A. A., Gajaria, T. K., Sathish, S., Kumar, J. A., Lakshmi, D. S., Kujawa, J., & Kujawski, W. (2023). Progress and prospective of the industrial development and applications of eco-friendly colorants: an insight into environmental impact and sustainability issues. *Foods* (Basel, Switzerland), 12(7), 1521. <https://doi.org/10.3390/foods12071521>
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2021). Biological properties and applications of betalains. *Molecules* (Basel, Switzerland), 26(9), 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>
- Salam, H. S., Tawfik, M. M., Elnagar, M. R., Mohammed, H. A., Zarka, M. A., & Awad, N. S. (2022). Potential apoptotic activities of *Hylocereus undatus* peel and pulp extracts in MCF-7 and Caco-2 cancer cell lines. *Plants* (Basel, Switzerland), 11(17), 2192. <https://doi.org/10.3390/plants11172192>
- Santos, M. C. D., & Bicas, J. L. (2021). Natural blue pigments and bikaverin. *Microbiological research*, 244, 126653. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126653>
- Suh, D. H., Lee, S., Heo, doY., Kim, Y. S., Cho, S. K., Lee, S., & Lee, C. H. (2014). Metabolite profiling of red and white pitayas (*Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*) for comparing betalain biosynthesis and antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(34), 8764–8771. <https://doi.org/10.1021/jf5020704>
- Tanaka, Y., Sasaki, N., & Ohmiya, A. (2008). Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The plant journal: for cell and molecular biology*, 54(4), 733–749. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03447.x>
- Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J., & Paucar-Menacho, L. (2020). Pitahaya (*Hylocereus spp.*):

- culture, physicochemical characteristics, nutritional composition, and bioactive compounds. *Sciencea Agropecuaria*. 11(3), 439–453.
- Weisbrod, D. B., Caruana, D. L., Li, D., Wan, L., & Szema, A. M. (2023). A Case report of Allergic hypersensitivity to color additives in Slurpee® Beverages. *The yale journal of biology and medicine*, 96(1), 79–82. <https://doi.org/10.59249/KGFT1011>
- Zhang, Q., Chumanevich, A. A., Nguyen, I., Chumanevich, A. A., Sartawi, N., Hogan, J., Khazan, M., Harris, Q., Massey, B., Chatzistamou, I., Buckhaults, P. J., Banister, C. E., Wirth, M., Hebert, J. R., Murphy, E. A., & Hofseth, L. J. (2023). The synthetic food dye, Red 40, causes DNA damage, causes colonic inflammation, and impacts the microbiome in mice. *Toxicology reports*, 11, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.08.006>.