



# *Del tecuitlatl azteca a la Spirulina: un recurso biotecnológico*

**From the aztec tecuitlatl to Spirulina: a biotechnological resource**

Recursos Naturales y Sociedad, 2023. Vol. 9 (2): 91-106. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.02.0008>

Cecilia Izchel Pérez Romero<sup>1</sup>, Bertha Olivia Arredondo Vega<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Biotecnología de Microalgas. Programa de Acuicultura. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR). Avenida IPN 195. Colonia Playa Palo de Santa Rita Sur. La Paz, Baja California Sur, 23096.

\*E-mail para la correspondencia: [kitty04@cibnor.mx](mailto:kitty04@cibnor.mx)



## Resumen

El tecuitlatl o *Spirulina maxima* desempeñó un papel importante en la alimentación de los aztecas, el cual era recolectado del lago de Texcoco en forma de lama que secaba al sol. *Spirulina maxima* pertenece al grupo de las cianobacterias fotosintéticas, se distribuye en ambientes salobres, de agua dulce y marinos. Por su elevado contenido de proteínas, ácidos grasos (ácido linolénico omega 3), pigmentos (clorofila *a*,  $\beta$ -caroteno), vitaminas, antioxidantes y minerales, está catalogada como complemento nutritivo para el humano. Además, en el sector alimenticio, es utilizada como colorante natural y ayuda en la prevención de algunas enfermedades. En este trabajo se presenta el potencial de *Spirulina maxima* respecto a su nivel nutrimental (alimento GRAS: Generalmente Reconocido como Alimento Seguro), como una alternativa viable para su escalamiento y comercialización en el Estado de Baja California Sur, en el entorno de la economía azul y circular.

**Palabras clave:** *tecuitlatl, proteínas, antioxidantes, vitaminas, alimento GRAS.*

## Abstract

Tecuitlatl or *Spirulina (Arthrospira) maxima* played an important role in the food of the Aztecs, which was collected from Lake Texcoco in the form of lama. *Spirulina maxima* belongs to the group of photosynthetic cyanobacteria. It is distributed in brackish, freshwater, and marine environments. Due to its high content of proteins, fatty acids (linoleic acid omega 3), pigments (chlorophyll *a*, and  $\beta$ -carotene), vitamins, antioxidants and minerals, it has been catalogued as a nutritional supplement for humans. Moreover, it is used in the food industry as a natural

pigment and to prevent specific diseases. In this review, it is presented the potential of *S. maxima* as a high-level GRAS food (Generally recognized as safe food), a viable alternative for scaling up and commercialization in the state of Baja California Sur, Mexico - as well as its future in the blue and circular economy.

**Key words:** *tecuitlatl, proteins, antioxidants, vitamins, GRAS food.*

## Antecedentes

Hace más de 500 años, en la antigua ciudad de Tenochtitlán, los aztecas cosechaban del gran Lago de Texcoco una lama verde espesa que parecía emanar de las piedras y que nadaba abundantemente en las oscuras aguas (Clavijero, 1853; Díaz del Castillo, 1955). En algunas épocas del año, la cosechaban extrayéndola con unas mallas finas y la extendían formando una capa gruesa sobre la orilla del lago hasta que se secaba, para preservarla (Figura 1) (de Motolinía, 1903). La consumían con maíz, frijoles, chiles y mole, o bien, la adicionaban a la masa de tortillas. Era tan popular, que su venta y consumo no se limitaba a los mercados locales, sino que también se llevaba en viajes largos fuera de la ciudad (DeRenzo, 2021; López de Gomara, 1552; de Motolinía, 1903). A

este curioso lodo verde-azulado se le conocía entre los aztecas como tecuitlatl, que significa “excremento de las piedras”, y fue de gran intriga para los colonizadores españoles que llegaron a la Nueva España. Se trataba de un ingrediente con sabor salado, comúnmente descrito como similar al queso, además de ser delicioso y nutritivo como complemento culinario para los nativos (Clavijero, 1853; Díaz del Castillo, 1955; de Motolinía, 1903). Sin embargo, no fue tan aceptado por los nuevos conquistadores, quienes lo apreciaron poco por su apariencia y porque no pudieron reconocer potencial alimenticio alguno. Así, junto con muchas de las costumbres indígenas, el tecuitlatl fue suprimido y modificado por otros más “civilizados”. De manera similar, la imposición de la Corona Española en la Nueva España conllevó a alteraciones significativas en los ecosistemas que no eran considerados adecuados para la arquitectura colonial, entre ellas, el drenaje del Lago de Texcoco. Con el paso del tiempo, la merma de poblaciones indígenas y la inevitable pérdida de cultura y tradiciones del antiguo México, el tecuitlatl quedó en el olvido por cientos de años (DeRenzo, 2021; Farrar, 1966).

Fue hasta la década de 1960 que nuestro país redescubrió, en unos estanques de evaporación remanentes del Lago de Texcoco, la misma lama que siglos atrás había poblado la cuenca más importante del Valle de México. Cuando la empresa Sosa Texcoco, comenzó a observar que “una sustancia color verde” arruinaba su trabajo (DeRenzo, 2021), nadie sospechaba que se tratase del antiguo tecuitlatl (DeRenzo, 2021; Sili *et al.*, 2012). Además, en los años de la conquista, resultaba difícil para los colonizadores saber exactamente qué era el tecuitlatl: era evidente que no se trataba de una planta, mucho menos de un animal. En aquella época, el desconocimiento sobre el mundo microbiano impedía a los españoles entender su verdadera naturaleza (Farrar, 1966), pero en 1960 fue diferente. Un equipo de investigadores franceses, pertenecientes al *Institute Française du Pétrole*, se dedicaron a



**Figura 1.** Aztecas recogiendo algas azules de los lagos del Valle de México. Original publicado en *Human Nature*, marzo de 1978 (Artículo de Peter T. Furst).

estudiar lo encontrado por la empresa Sosa Texcoco, identificándola como *Spirulina*, una cianobacteria de alto valor nutricional que ya había sido observada en regiones africanas, en donde su consumo era similar al que realizaron los aztecas. La caracterización de la *Spirulina* en el Lago de Texcoco derivó en estudios enfocados a su cultivo en gran escala, impulsado en México principalmente por la misma empresa Sosa Texcoco, quienes llegaron a producir hasta 500 toneladas al año de biomasa seca (Habib *et al.*,



2008; DeRenzo, 2021). A nivel mundial, su evaluación en cuanto a la calidad bioquímica cobró mayor importancia por su aplicación en la industria alimentaria y biotecnológica, así como en la obtención de colorantes naturales (como la ficocianina) usados en cosmética y pinturas (Abed *et al.*, 2009; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006).

### ¿Qué es la *Spirulina* hoy en día?

*Spirulina* se refiere a un tipo de microorganismo que pertenece al filo de las cianobacterias, comúnmente conocido como “algas verdes-azules”. Este grupo engloba más de 270 géneros de procariontes fotosintéticos, gram negativos (Abed *et al.*, 2009; Castro-Zamora *et al.*, 2018; Huang y Zimba, 2019; Fernández-Honores *et al.*, 2019; Whitton y Potts, 2012). Estos microorganismos son importantes ya que suelen ser la base de la cadena trófica, al ser productores primarios. Además, algunos tipos de cianobacterias son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (Fernández-Honores *et al.*, 2019), lo cual permite transformarlo en formas más accesibles para que otros organismos, como plantas y animales, lo puedan utilizar.

La capacidad que presentan las cianobacterias para adaptarse a diferentes condiciones ambientales las cataloga como uno de los microorganismos más importantes y antiguos de nuestro planeta (Abed *et al.*, 2009; Whitton y Potts, 2012). Por ejemplo, habitan en un amplio rango de temperatura (20 a 40 °C) y de salinidad (20 a 35 ppm), son capaces de utilizar eficientemente la luz en ambientes limitados (especies acuáticas), soportan altos niveles de radiación UV y forman vacuolas de gas (Whitton y Potts, 2012).

Estudios posteriores descubrieron que la *Spirulina* encontrada en el Lago de Texcoco y en el Lago de Chad, en África, corresponde a una cianobacteria acuática perteneciente al género *Arthrospira*, que se caracteriza por formar estructuras

filamentosas multicelulares, septadas (con segmentos bien definidos y fácilmente visibles al microscopio), con forma helicoidal, llamadas tricomas (Figura 2). El tamaño del filamento varía dependiendo de la especie, así como de las condiciones de su cultivo, pero generalmente oscila entre 50 y 55 mm de largo y 2.5 y 16 mm de ancho (Habib *et al.*, 2008; Castro-Zamora *et al.*, 2018; Sili *et al.*, 2012).

Además, suelen presentar varias vacuolas de gas que les proporciona flotabilidad, por lo que son consideradas planctónicas (Hernández-Uribe, 2016; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006; Sili *et al.*, 2012), aunque también existen especies bentónicas; es decir, que se encuentran fijadas al suelo marino (Cifuentes-Lemus *et al.*, 1997; Tomaselli, 1997).

Crece en ambientes alcalinos de agua dulce y marinos, en un rango de pH de 9 a 11, y en climas templados que varía entre 25 a 40 °C, como en los lagos denominados *Soda-lakes* (Habib

*et al.*, 2008; Castro-Zamora *et al.*, 2018; Hernández-Uribe, 2016; Sili *et al.*, 2012). Por lo anterior, su distribución geográfica es cosmopolita, siendo reportada en Europa, Asia, África y América (Sili *et al.*, 2012).

Las cianobacterias formadoras del tecuitlatl fueron originalmente denominadas como *Spirulina* debido a su forma de filamento helicoidal. Recientemente se ha estudiado y reclasificado taxonómicamente dentro del género *Arthrospira*, destacando *A. maxima*, *A. fusiformis* y *A. platensis* (Komárek y Lund, 1990; Sili *et al.*, 2012; Tomaselli, 1997) (Tabla 1). Otras especies no tan conocidas y que aún no se han cultivado a nivel industrial se han incluido, tales como, *A. jenneri* y *A. indica* (Sili *et al.*, 2012). Aunque en la actualidad estos microorganismos son utilizados comercialmente bajo el nombre de *Spirulina* de forma indiferente, es importante enfatizar la taxonomía correcta y evitar confusiones.

*A. maxima* es la cianobacteria que se conoció en la antigüedad como tecuitlatl y aquella que se encontró en los estanques de la empresa Sosa Texcoco (Hernández-Uribe, 2016; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Es probable que el sabor salado que describieron los colonizadores

fuera en parte debido a la gran cantidad de sal en el lago, necesaria para los “*blooms* de *Spirulina*”. El antiguo Lago de Texcoco es una porción de un gran sistema de lagos comunicados entre sí, conocido como la Cuenca de México.

A diferencia de sus lagunas pantanosas hermanas, como el Lago de Xochimilco, en el Lago de Texcoco predominaban las aguas salobres debido a la presencia de suelos salinos y aguas poco profundas que facilitaban una alta concentración de sales, sulfatos y sulfitos (CONANP, 2021).

Este ambiente proporcionó las condiciones necesarias, aunado a la temperatura, pH, alta irradiancia y niveles de CO<sub>2</sub>, para que se favoreciera el crecimiento de *A. maxima*, a tal punto de ser considerado como su hábitat natural (Durand-Chastel, 1980; Hernández-Uribe, 2016; Sili *et al.*, 2012).

*Spirulina (Arthrospira)* posee un perfil nutrimental excepcional, ya que contiene los macro y micronutrientes necesarios para una buena



**Figura 2.** Imagen de microscopía óptica de *Spirulina (Arthrospira) maxima*. Imagen: Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR, La Paz, Baja California Sur, México.



alimentación (Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006); además, tiene una alta concentración de proteínas (50 al 70%) y presenta todos los aminoácidos esenciales (Habib *et al.*, 2008; Castro-Zamora *et al.*, 2018; Hernández-Uribe, 2016; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006).

**Tabla 1.** Diferencias morfológicas entre los géneros *Spirulina* y *Arthrospira* (Stizenberger 1852; Turpin 1827).

Características	<i>Arthrospira</i>	<i>Spirulina</i>
Diámetro del tricoma	2.5 – 16 $\mu\text{m}$	0.5 – 5 $\mu\text{m}$
Tipo de filamento	Abierto	Cerrado
Septos	Visibles al microscopio	Invisibles al microscopio
Tipo de fragmentación	Intracelular (necridio)	Intercelular

Esta característica supera la disponibilidad y calidad de las proteínas vegetales, y puede ser equiparable a las proteínas animales (Falquet y Hurni, 1997). En cuanto a los lípidos (5 a 7%), es rico en ácidos grasos poliinsaturados de la familia omega 6 y omega 3, como el ácido gamma-linolénico y el ácido linolénico (Habib *et al.*, 2008; Falquet y Hurni, 1997; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Falquet y Hurni (1997) mencionan que los contenidos de vitaminas E y complejo B en *Spirulina*, oscilan entre 50 a 190 y 30 a 50 mg/kg del peso seco, respectivamente.

Hernández-Uribe (2016) reportó una concentración de vitamina C de 0.011 mg/mg de peso seco. El b-caroteno, conocido como pro-vitamina A, está entre 700 y 1,700 mg/kg (Falquet y Hurni, 1997).

En cuanto a minerales, *Spirulina* contiene hierro, calcio, magnesio, fósforo y potasio (0.87, 4.68, 3.19, 9.61 y 16.60 mg/g de peso seco, respectivamente), cuyos porcentajes son similares a la leche y a algunos cereales (Falquet y Hurni, 1997; Henrikson, 1994; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). También contiene pigmentos antioxidantes denominados carotenoides como el ya mencionado b-caroteno y xantófilas (zeaxantina); así como el complejo de ficobiliproteínas -ficocianina y aloficocianina- (pigmentos asociados a proteínas) que le dan el color verde-azul

característico de la *Spirulina* (Figura 3) (Habib *et al.*, 2008; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006).

Las células de *Spirulina* están contenidas dentro de una membrana celular frágil que permite que todos sus componentes nutrimentales (proteínas, ácidos grasos, vitaminas, minerales y antioxidantes) estén disponibles al momento de consumirla. Además, numerosos estudios han descartado que su consumo pueda provocar toxicidad, tanto en humanos como en animales (Chamorro *et al.*, 2002), por lo que se ha asignado como alimento Generalmente Reconocido como Seguro (GRAS) por la Food Drug Administration (FDA, 2023), institución internacional encargada de regular aditivos alimentarios (Suárez-Diéquez *et al.*, 2014).

### ¿Cómo se cultiva la *Spirulina*?

El valor nutricional y el contenido de compuestos bioactivos de las cianobacterias han demostrado su potencial

para la producción masiva con aprovechamiento en distintas industrias, desde la farmacéutica hasta biomateriales y biorremediación (Abed *et al.*, 2009; Vanthoor-Koopmans *et al.*, 2014). La *Spirulina* no es la excepción, debido a su alto contenido proteico, es una de las cianobacterias que más se produce a nivel mundial (Oliveira *et al.*, 1999; Sili *et al.*, 2012; Vanthoor-Koopmans *et al.*, 2014). Para cumplir la alta demanda, se han desarrollado sistemas de cultivos masivos, basados en los ambientes donde la *Spirulina* crece de manera natural. En los ecosistemas, son comunes las variaciones en parámetros que regulan el desarrollo de las microalgas y cianobacterias, por lo que, para comercializarla ha sido necesario estudiar su comportamiento y composición bajo distintas condiciones ambientales hasta lograr optimizar los cultivos, dependiendo de los objetivos de la producción (Acién-Fernández *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 1999; Sili *et al.*, 2012).



**Figura 3.** Extractos de aloficocianina (izquierda) y ficocianina (derecha,) obtenidos a partir de biomasa fresca de *Spirulina (Arthrospira) maxima*. Imágenes: Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR, La Paz, Baja California Sur, México.

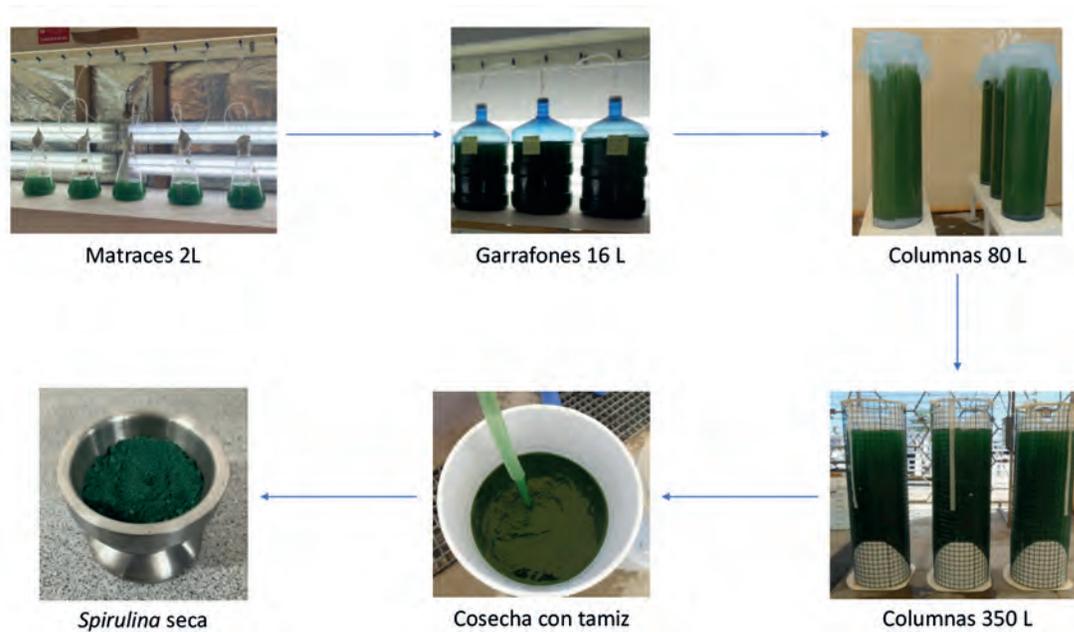
Se han desarrollado diversos sistemas de cultivos que se pueden generalizar en dos tipos: cerrados y abiertos (Habib *et al.*, 2008; Sili *et al.*, 2012). Los cerrados, consisten en recipientes especializados (biorreactores), cuya característica es la de impedir contaminaciones y controlar las condiciones ambientales, obteniendo así un producto de mayor calidad (Acién-Fernández *et al.*, 2021).

Los cultivos abiertos suelen ser estanques a la intemperie, de baja profundidad, denominados *raceways*. Estos resultan más accesibles económicamente y dan un buen rendimiento, aunque son difíciles de mantener libres de contaminación (Acién-Fernández *et al.*, 2021; Habib *et al.*, 2008). *Spirulina* también se produce en menor escala en condiciones de laboratorio, la cual se va escalando desde matraces, botellones, columnas de diferentes volúmenes o pequeñas piletas, que pueden o no estar equipadas de forma similar a los *raceways* (Figura



4). Las aplicaciones de estos cultivos se usan a nivel de escala piloto, o bien, para investigación (Habib *et al.*, 2008).

Es común que los cultivos en condiciones de laboratorio estén acondicionados con sistemas para monitorear o controlar la luz, el pH, la temperatura y el medio en el que se desarrollan, al ser estos parámetros los que mayor efecto tienen sobre el crecimiento de la cianobacteria (Habib *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 1999; Sili *et al.*, 2012; Usharani *et al.*, 2012)



**Figura 4.** Diagrama de flujo del cultivo y escalamiento de *Spirulina* (*Arthrospira*) *maxima*. Imágenes: Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR, La Paz, Baja California Sur, México.

Normalmente, las células de *Spirulina* se cultivan entre 25 y 40° C (Habib *et al.*, 2008; Colla *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 1999; Sili *et al.*, 2012; Usharani *et al.*, 2012), en medio salobre (20 a 30 ppm) y pH alcalino (9 a 11) provisto con bicarbonato y carbonato de sodio como fuentes de carbono (Habib *et al.*, 2008; Sili *et al.*, 2012; Usharani *et al.*, 2012)

El alto pH y la alcalinidad del medio limitan el crecimiento de otros microorganismos, por lo que facilita su cultivo en sistemas abiertos (Sili *et al.*, 2012). La luz también juega un papel importante, pues las células cuentan con un ciclo de luz-oscuridad para su desarrollo. La elevada o intensa cantidad de luz puede llegar a inhibir la fotosíntesis (Habib *et al.*, 2008; Sili *et al.*, 2012). Las modificaciones en estos parámetros provocan cambios en el metabolismo primario y secundario de las células de *Spirulina*, lo cual se puede ver reflejado en las propiedades nutrimentales. Esto puede aprovecharse para favorecer la producción de un compuesto de interés, como proteínas o antioxidantes (Hernández-Urbe, 2016).

Una vez que se tiene una cantidad suficiente de células de *Spirulina*, se cosecha la biomasa de forma similar a como se recuperaba el tecuitlatl; es decir, se drena el medio de cultivo a través de unos filtros con poros finos que retienen a la *Spirulina*, y la biomasa se lava con agua para eliminar las sales. Una vez que se vuelve a eliminar el líquido excedente, se procede a secar, triturar y empaclar la cosecha para conservarla mientras se utiliza (Figura 5) (Habib *et al.*, 2008).



**Figura 5.** Biomasa seca de *Spirulina (Arthrospira) maxima*. Imagen: Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR, La Paz, Baja California Sur, México.

### **Usos y aplicaciones**

La principal aplicación comercial de la *Spirulina* es como complemento alimenticio. Su designación como GRAS, la ha posicionado como un producto de alta calidad, comercializado en forma de comprimidos y cápsulas. También se utiliza como un aditivo en bebidas, dulces, barras de cereal, chocolates, panes y tortillas (Figura 6) (Castro-Zamora *et al.*, 2018; Falquet y Hurni,

1997; Hernández-Uribe, 2016; Sili *et al.*, 2012).

Puede ser consumido por niños, jóvenes, adultos y hasta atletas que buscan una fuente de proteína adicional (Castro-Zamora *et al.*, 2018). Por otro lado, la ficocianina contenida en *Spirulina* se utiliza como colorante azul de grado alimenticio en helados, gomas de mascar, productos lácteos y bebidas, además de ser un pigmento natural cosmético importante (Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006; Sili *et al.*, 2012). De forma similar, el Beta-caroteno cumple el mismo propósito en las mismas industrias (Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Uno de sus mayores potenciales reside en la accesibilidad como una alternativa de alimento completo. La alta calidad nutricional en cuanto a proteínas, ácidos grasos, micronutrientes, vitaminas y minerales, son importantes para tratar algunas deficiencias nutricionales, como la anemia en adultos mayores, niños menores de 6 años y

poblaciones vulnerables con difícil acceso a una alimentación apropiada (Castro-Zamora *et al.*, 2018; Falquet y Hurni, 1997; Gómez, 2020). Las dietas basadas en *Spirulina* son equiparables con aquellas basadas en proteínas animales, y se necesita en poca cantidad (10 g por día) para revertir los efectos de la malnutrición (Habib *et al.*, 2008).



**Figura 6.** Aplicaciones de *Spirulina* (*Arthrospira*) *maxima* como complemento alimenticio, rico en proteínas. A y B. Tortillas con *Spirulina*. C y D. Gorditas con queso y *Spirulina*. E y F. Pan dulce adicionado de *Spirulina*. Imágenes tomadas por Cecilia Izchel Pérez-Romero.

*Spirulina* también ha sido utilizada como alimento completo y suplemento en animales, sobre todo en la acuicultura para peces, moluscos y crustáceos. Además de proveer una buena alimentación a bajo costo, ayuda a que los cultivos mantengan una buena coloración y aumenten sus tasas de crecimiento, supervivencia y fertilidad respecto al uso de otro tipo de alimentos (Habib *et al.*, 2008; Gómez, 2020).

Recientemente, el uso de *Spirulina* dentro de la industria farmacéutica ha cobrado importancia por sus propiedades terapéuticas y como nutraceutico (Habib *et al.*, 2008; Castro-

Zamora *et al.*, 2018; Gouveia *et al.*, 2008; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006).

La ficocianina, así como los carotenoides y la vitamina E, han mostrado proveer efectos antioxidantes a la *Spirulina* (Chamorro *et al.*, 2002; Falquet y Hurni, 1997; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Los exopolisacáridos y las pectinas producidas por las células de *Spirulina* han despertado interés por sus aplicaciones como anticoagulantes y cicatrizantes, respectivamente (Edirisinghe *et al.*, 2020; Hayakawa *et al.*, 1996; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006). Así mismo, se le han atribuido propiedades inmunoestimulantes, antivirales, hipolipidémicas e incluso anticancerígenas en modelos celulares, animales (ratones y pollos) y humanos.

También se sabe que ayuda a prevenir y controlar enfermedades cardiovasculares, virales e inmunodeficiencias, por mencionar algunas (Chamorro *et al.*, 2002; Ramírez-Moreno y Olvera-Ramírez, 2006).

### **Consideraciones finales y perspectivas**

Las crisis ambiental y alimentaria que aquejan al mundo, principalmente en países subdesarrollados o en vía de desarrollo, son una de las consternaciones actuales. La necesidad de instaurar sistemas integrales, que permitan redituar al máximo los recursos invertidos con impacto mínimo en el medio ambiente, es cada vez más inminente. *Spirulina* tiene la ventaja de generar biomasa cosechable en un corto tiempo, lo cual se traduce en una forma sumamente eficiente de producción. El aprovechamiento de espacio que representa, supera en creces la producción que se obtendría de cualquier otro cultivo vegetal o criadero animal. Surge, entonces, una oportunidad de nicho económico local, principalmente en comunidades con severa escasez de recursos (Henrikson, 1994). Los enfoques en estos proyectos son diversos, tales como, aplicaciones en cultivos agrícolas en forma de biofertilizante, o bien para consumo y venta directa (Fox, 1986; Henrikson, 1994). En México, ya se han implementado diversos proyectos gubernamentales enfocados en la capacitación de comunidades pesqueras de zonas rurales en Aguascalientes (Gobierno de México, 2015).

El Laboratorio de Biotecnología de Microalgas del CIBNOR tiene experiencia en el cultivo y escalamiento de *Spirulina* (*Arthrospira*) *maxima*. Se ha evaluado la calidad nutricional y microbiológica, resultando un producto con alto contenido de proteínas (50 al 60% con respecto a su peso seco) y libre de patógenos. Así mismo, se han desarrollado productos alimenticios a nivel de laboratorio, utilizando *Spirulina* en forma de polvo, para elaborar tortillas, gorditas de maíz, empanadas, panecitos, malteadas y como aditivo para el aderezo de ensaladas (Figura 6).

En un futuro, este trabajo ayudará a implementar de forma local sistemas de producción y alimentación que apoyen a la población sudcaliforniana, ¿y por qué no? en otros lugares de México o el mundo.

Aunado a esto, los sistemas utilizados para cultivar *Spirulina* a gran escala, pueden ser adaptados para ir más allá de sólo producción comercial. En los últimos años, se han realizado estudios que evalúan el cultivo de *Spirulina* a partir de aguas residuales agrícolas, industriales y domésticas, con resultados exitosos y prometedores. A pesar de que la *Spirulina* producida no pueda ser utilizada para consumo humano, aún brinda muchas oportunidades económicas para aprovechar al máximo la biomasa a partir de la extracción de compuestos como colorantes naturales y polisacáridos gelificantes con diferentes aplicaciones (Al-Jabri *et al.*, 2021; Olguín *et al.*, 2022).

En el libro “La economía azul” (2010), Gunter Pauli exhorta a los gobiernos, empresas e industrias, a trasladar sus procesos individuales hacia uno más completo, que incorpore los desechos como materia prima. Bajo esta visión surgen diversos conceptos que buscan



englobar bioprocesos de forma verdaderamente sostenible, como la economía azul y circular (Olguín *et al.*, 2022; Pauli, 2010), dentro de los que se establece la producción de *Spirulina*. Así, se intenta simular de forma fiel el *modus operandi* de la naturaleza, que permita un equilibrio entre la abundancia de recursos naturales disponibles y el impulso económico a nivel global. Los residuos re-valorizados dentro de cadenas de valor comercializables, derivan en enfoques multipropósito y multiproducto, enfocados en aminorar el impacto ambiental y aumentar las oportunidades laborales (Acién *et al.*, 2021; Al-Jabri *et al.*, 2021; Pauli, 2010). México, con su emblemático tecuitlatl, también puede ser parte de estos esfuerzos.

### Agradecimientos

Las autoras agradecen al Programa de Acuicultura del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), por las facilidades para realizar el cultivo y escalamiento de *Spirulina (Arthrospira) maxima*. De igual manera, al personal de nuestra institución, Dr. Eduardo Quiroz Guzmán, Dr. Bernardo Veyrand, Dra. Norma Angélica Ochoa Álvarez (Laboratorio de Microbiología), QFB Marte Virgen Félix (responsable técnico del Cepario), Ing. Pesquero Julián Alfonso Garzón Favela (responsable técnico del Laboratorio de Microalgas) y Biol. Marino Gabriel González Gómez.

### Literatura citada

- Abed, R.M.M., Dobretsov, S. y Sudesh K. 2009. *Applications of cyanobacteria in biotechnology*. Journal of Applied Microbiology, 106 (1): 1-12.
- Acién, F.G., Reis, A., Wijffels, R.H., Barbosa, M., Verdelho, V. y Llamas, B. 2021. *The role of microalgae in the bioeconomy*. New Biotechnology, (61): 99-107.
- Al-Jabri, H., Das, P., Khan, S., Thaher, M. y AbdulQuadir, M. 2021. *Treatment of Wastewaters by Microalgae and the Potential Applications of the Produced Biomass—A Review*. Water, 13(1): 27-53.
- Castro-Zamora, A.A., Borbón-Castro, N.A., Simental-Trinidad, J.A., Gómez-Infante, E., Félix-Ibarra, L.I., Rangel-Colmenero, B.R. y Méndez Estrada, R.O. 2018. *Consumo de Spirulina spp. (Arthrospira) como una alternativa en la nutrición humana: Una Revisión bibliográfica*. Revista De Investigación Académica Sin Frontera: División De Ciencias Económicas y Sociales, 10(26).
- Chamorro, G., Salazar, M., Gomes de Lima Araújo, K., Pereira dos Santos, C., Ceballos, G. y Fabila Castillo, L. (2002). Actualización en la farmacología de *Spirulina (Arthrospira)*, un alimento no convencional. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 52(3): 232-240.

- Clavijero, S.F. 1853. *Historia antigua de Mejico*. Puebla, México. 320 pp.
- Cifuentes-Lemus, J.L., Torres-García, P. y Frías, M. 1997. *Organismos de los fondos oceánicos o bentónicos*. En <https://cidta.usal.es/cursos/biologia/modulos/Curso/Libros/pdf/BENTOS%20Y%20NECTON.PDF> (consultado 22/03/2023).
- Colla, L.M., Bertolin, T.E. y Costa, J.A. 2004. *Fatty acids profile of Spirulina platensis grown under different temperatures and nitrogen concentrations*. Journal of Biosciences: Zeitschrift für Naturforschung C, 59(1-2): 55-9.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2021. *Estudio Previo Justificativo para la declaratoria del Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 386 pp.
- DeRenzo, N. 2021. *Espirulina, el superalimento de los aztecas que vive un boom en México*. En <https://www.bbc.com/mundo/vert-tra-55670748> (consultado 22/03/2023).
- Díaz del Castillo, B. 1955. *Historia verdadera de la conquista de la Nueva España, Tomo I*. Porrúa. México, México. 279 pp.
- Durand-Chastel, H. 1980. *Production and use of Spirulina in México*. En: Shelef, G. y Soeder, C.J. (Eds.). Algae biomass. Elsevier, North Holland Biomedical Press. Amsterdam, Holland. 39 pp.
- Edirisinghe, S. L., Rajapaksha, D. C., Nikapitiya, C., Oh, C., Lee, K.-A., Kang, D.-H., y De Zoysa, M. 2020. *Spirulina maxima derived marine pectin promotes the in vitro and in vivo regeneration and wound healing in zebrafish*. Fish and Shellfish Immunology, (107 A): 414-425.
- Falquet, J. y Hurni, J. P. 1997. *The nutritional aspects of Spirulina*. Antenna Foundation. [https://antenna.ch/wp-content/uploads/2017/03/AspectNut\\_UK.pdf](https://antenna.ch/wp-content/uploads/2017/03/AspectNut_UK.pdf) (consultado 22/03/2023)
- Farrar, W. V. 1966. *Tecuitlatl; A Glimpse of Aztec Food Technology*. Nature, 211 (5047): 341 – 342. doi:10.1038/211341a0
- FDA (U.S. Food and Drug Administration). 2023. *GRAS Notices*. En [https://www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/?set=GRASNotices&sort=GRN\\_No&order=DESC&startrow=1&type=basic&search=spirulina](https://www.cfsanappsexternal.fda.gov/scripts/fdcc/?set=GRASNotices&sort=GRN_No&order=DESC&startrow=1&type=basic&search=spirulina) (consultado 02/04/2023)
- Fernández-Honores, A.M., Alvítez-Izquierdo, E. y Rodríguez-Rodríguez, E.F. 2019. *Taxonomía e importancia de "Spirulina" Arthrospira jenniferi (Cyanophyceae: Oscillatoriaceae)*. Arnelo, 26(3): 1091-1104.
- Fox, R.D. 1986. *Algoculture: La Spirulina, un espoir pour le monde de la faim*. Edisud. Francia. 319 pp.
- Furst, P.T. 1978. *Spirulina*. Human Nature, 1(3): 60-65.



- Gobierno de México. 2015. *Apoyo a productores acuícolas, para diversificar la producción con alga Spirulina*. En <https://www.gob.mx/agricultura%7Caguascalientes/articulos/apoyo-a-productores-acuicolas-para-diversificar-la-produccion-con-alga-spirulina> (consultado 14/04/23)
- Gómez, KA. 2020. *Aplicación de Spirulina en el desarrollo de alimentación humana y animal*. Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia. España. 22 pp.
- Gouveia, L., Batista, A.P., Sousa, I., Raymundo, A. y Bandarra, N.M. 2008. *Microalgae in novel food products*. En Papadopoulos, K.N. (Ed) *Food Chemistry Research Developments*, vol 2. Nova Science Publishers, Inc. New York, USA. 297 pp.
- Habib, M.A.B., Parvin, M., Huntington, T.C. y Hasan, M.R. 2008. *A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestic animals and fish*. *FAO Fisheries and Aquaculture Circular*, 1034: 33p.
- Hayakawa, Y., Hayashi, T., Hayashi, K., Hayashi, T., Ozawa, T., Niiya, K. y Sakuragawa, N. 1996. Heparin cofactor II-dependent antithrombin activity of calcium spirulan. *Blood Coagulation and Fibrinolysis*, 7(5): 554-60.
- Henrikson, R. 1994. *Microalga Spirulina: Superalimento del futuro*. Ediciones Urano. España. 220 pp.
- Hernández-Uribe, F. 2016. *Efecto de la deficiencia de nitrógeno y la radiación UV en la actividad fotosintética y en los compuestos antioxidantes de las cianobacterias Spirulina (Arthrospira) maxima y Phormidium persicinum*. Tesis de maestría, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. México. 180 pp.
- Huang, I.-S., y Zimba, P.V. 2019. *Cyanobacterial bioactive metabolites—A review of their chemistry and biology*. *Harmful Algae*, (86): 139-209.
- Komárek, J. y Lund, J.W.G. 1990. *What is "Spirulina platensis" in fact?*. *Algological Studies Supplement Volumes*, 58(85): 1-13.
- López de Gomara, F. 1552. *La conquista de Méjico*. En <https://www.cervantesvirtual.com/obra/la-conquista-de-mexico-953174/> (consultado 22/03/2023)
- De Motolinía, T. 1903. *Memoriales (Documentos históricos de Méjico)*. En <http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1080028319/1080028319.html> (consultado 22/03/2023)
- Olguín, E.J., Sánchez-Galván, G., Arias-Olguín, I.I., Melo, F.J., González-Portela, R.E., Cruz, L., De Philippis, R. y Adessi, A. 2022. *Microalgae-Based Biorefineries: Challenges and Future Trends to Produce Carbohydrate Enriched Biomass, High-Added Value Products and Bioactive Compounds*. *Biology*, 11: 1146.

- Oliveira, M.A.C.L., de Monteiro, M. P. C., Robbs, P. G. y Leite, S. G. F. 1999. *Growth and chemical composition of Spirulina maxima and Spirulina platensis biomass at different temperatures*. *Aquaculture International*, 7(4): 261–275.
- Pauli, G. 2010. *La economía azul: 10 años, 100 innovaciones, 100 millones de empleos*. Tusquets Ediciones. Barcelona, España. 344 pp.
- Ramírez-Moreno, L. y Olvera-Ramírez, R. 2006. *Uso tradicional y actual de Spirulina sp. (Arthrospira sp.)*. *Interciencia*, 31(9): 657-663.
- Sili, C., Torzillo, G. y Vonshak, A. 2012. *Arthrospira (Spirulina)*. pp. 677-705. En Whitton, B.A. (Ed.). *Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time*. Springer Dordrecht. New York, USA. 760 pp.
- Stizenberger, E. 1852. *Spirulina und Arthrospira (nov. gen.)*. *Hedwigia*, 1: 32–41.
- Suarez-Diéguez, T., González- Escalante, E., Reséndiz- Martínez, Y. y Sánchez- Martínez, D. 2014. *La importancia de los aditivos alimentarios en los alimentos industrializados*. *Educación Y Salud Boletín Científico Instituto De Ciencias De La Salud Universidad Autónoma del Estado De Hidalgo*, 2(4). <https://doi.org/10.29057/icsa.v2i4.752>
- Tomaselli, L. 1997. *Morphology, Ultrastructure and Taxonomy of Arthrospira (Spirulina) maxima and Arthrospira (Spirulina) platensis*. En Vonshak, A. (Ed.). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell-Biology and Biotechnology*. CRC Press. New York, USA. 232 pp.
- Turpin, PJF. 1827. *Spirulina oscillarioide*. En De Lévrault, F.G. (Ed.). *Dictionnaire des Sciences Naturelles* vol. 50. Paris. 554 pp.
- Usharani, G., Saranraj, P. y Kanchana, D. 2012. *Spirulina cultivation: A review*. *International Journal of Pharmaceutical and Biological Archives*, 3(6): 1327-1341.
- Vanthoor-Koopmans, M., Córdoba-Matson, M.V., Arredondo-Vega, B.O., Lozano-Ramírez, C., García-Trejo, J.F. y Rodríguez-Palacio, M.C. 2014. *Microalgae and Cyanobacteria Production for Feed and Food Supplements*. pp. 253-275. En Guevara-Gonzalez, R. y Torres-Pacheco, I. (Eds.). *Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI*. Springer Cham. Suiza. 476 pp.
- Whitton, B.A. y Potts, M. 2012. *Introduction to the Cyanobacteria*. pp. 1-13. En Whitton, B.A. (Ed.). *Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time*. Springer Dordrecht. New York, USA. 760 pp.



### Cita de artículo:

Pérez Romero, C. I., y Arredondo Vega, B. O. Del tecuitlatl azteca a la Spirulina: un recurso biotecnológico. Recursos Naturales y Sociedad, 2023. Vol. 9 (2): 91-106. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.02.0008>

*Sometido: abril 2023*

*Aceptado: 3 de julio de 2023*

*Editor asociado: Dr. José Quinatzin García Maldonado*

*Editor Ejecutivo: Dr. Arturo Sánchez Paz*

*Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández*