



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD
DEPARTAMENTO EL HOMBRE Y SU AMBIENTE
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN BIOLOGÍA

Manual para el cultivo artesanal de espirulina (*Arthrospira* spp.) en San Salvador Atenco, México.

QUE PRESENTA EL ALUMNO

Gabriel Cruz Woo

Matrícula

2153027477

ASESORES:

M. en C. María Guadalupe Figueroa Torres (Interno)
UAM Xochimilco (14403)

M. en C. Rosario Clara Vargas Solís (Interno)
UAM Xochimilco (4664)

CDMX

Julio, 2022

Resumen:

Se le denomina cultivo artesanal de espirulina, al cultivo de especies de cianobacterias del género *Arthrospira* como pueden ser *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis* de una manera de producción no industrial que involucran técnicas y maquinarias simples y económicas al alcance de cualquier algocultor, permitiéndoles comercializar y difundir el cultivo en zonas locales. Las empresas dedicadas a la producción artesanal de espirulina son generalmente microempresas que se caracterizan por una plantilla laboral no mayor de 10 trabajadores, con sistemas de cultivo abiertos en lagos o estanques naturales o invernaderos con sistemas de cultivo estilo raceways, con cosecha mediante filtración, tamizado o prensado y secado de biomasa mediante la radiación solar directa o indirecta. La espirulina es considerada un superalimento por diversas instancias nacionales e internacionales debido a sus valores micro y macro nutricionales. Históricamente en México, el consumo de la espirulina se remonta a tiempos prehispánicos y en la actualidad se encuentra y se sigue cultivando la espirulina en el lago de Texcoco y pueblos aledaños al Valle de México como lo es San Salvador Atenco; sin embargo, la producción local enfrenta la problemática de no cubrir la demanda por insuficiencia de producción. El manual elaborado en esta investigación se realizó mediante la recopilación y revisión bibliográfica exhaustiva de diferentes fuentes informativas, yendo de lo general a lo particular, teniendo como objetivo la explicación de la información detalladamente y concisa sobre algunos puntos a considerar para el cultivo de espirulina como la caracterización del género *Arthrospira*, requerimientos de instalaciones y maquinarias para el cultivo, factores fisicoquímicos para el cultivo, normativas legales, entre otros, para lograr un óptimo aprovechamiento y desarrollo. La difusión de la información del manual se realizó a través de conferencias con público interesado en el tema y repartición de trípticos.

Palabras clave: Espirulina, cultivo artesanal, San Salvador Atenco, alimentación.

ÍNDICE

Introducción	1
Revisión de Literatura	2
Objetivo	3
Objetivos particulares	3
Metodología	3
Resultados	4
Capítulo I: Biología de la espirulina (<i>Arthrospira</i> spp.).	4
Taxonomía y caracterización	4
Especies	5
Reproducción	7
Ecología	8
Capítulo II: Composición bioquímica y propiedades nutricionales de la espirulina.	8
Proteínas	10
Vitaminas	11
Ácidos grasos esenciales	11
Minerales	11
Pigmentos fotosintéticos	11
Capítulo III: Sistemas de cultivo.	12
Principales tipos de sistemas de cultivo	12
Sistemas abiertos	12
Sistemas abiertos en aguas naturales	13
Sistemas inclinados	13
Estanques circulares	14
Raceways	15
Sistemas cerrados	15
Fotobiorreactores tubulares	16
Fotobiorreactores de placas planas	17
Fotobiorreactores de columnas	18
Capítulo IV: Técnicas de cosecha.	19
Centrifugación	19
Sedimentación por gravedad	20
Filtración	20
Tamizado	20
Prensado	20
Floculación	20
Flotación por aire	21
Capítulo V: Métodos para el secado de la biomasa.	21
Secado solar	22
Secado por convección	23

Secado por aspersión _____	23
Secado por liofilización _____	23
Secado con rodillos/tambores _____	24
Secado en lecho fluidizado _____	24
Secado mediante radiación _____	24
Capítulo VI: ¿En qué consiste un cultivo artesanal de espirulina? _____	25
Capítulo VII: Parámetros fisicoquímicos para el cultivo artesanal de espirulina. _	25
Calidad del agua _____	25
pH del agua _____	25
Nivel del agua _____	26
Concentración de espirulina _____	26
Luz _____	27
Agitación _____	27
Temperatura _____	28
Salinidad _____	28
CO ₂ _____	28
Nutrientes _____	29
Tamaño de inóculo _____	29
Capítulo VIII: Principales fuentes de contaminación en el cultivo artesanal de espirulina. _____	30
Algas indeseables _____	30
Mohos, levaduras y hongos _____	30
Bacterias _____	31
Zooplancton _____	31
Insectos _____	31
Otros contaminantes _____	31
Capítulo IX: Requerimientos legales y normativos para la producción empresarial de un cultivo artesanal de espirulina en San Salvador Atenco, México. _____	31
Localización e información de San Salvador Atenco _____	31
Requerimientos legales y normativos para la certificación de alimentos y/o suplementos alimenticios de espirulina _____	32
Ley General de Salud _____	33
Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicios _____	34
Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009 _____	35
Norma Mexicana NMX-F-508-1988 _____	44
Discusión _____	47
Conclusiones _____	48
Referencias _____	49
Anexos _____	59

Introducción.

El nombre de espirulina (género *Arthrospira* spp.) corresponde a un conjunto de especies de cianobacterias procariontes verdeazuladas, de forma filamentosas, multicelulares, con reproducción por fisión binaria, habitantes principalmente de lagos alcalinos y que debido a sus altos contenidos nutricionales se cultiva en ambientes acuáticos controlados, para garantizar su calidad e inocuidad para el consumo humano (Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006; Tarazona-Díaz, 2018).

Debido a que la espirulina posee un gran valor de importancia nutricional, en 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS), nombró a estas cianobacterias como un “superalimento” para combatir el problema de desnutrición y la carencia de micronutrientes y macronutrientes en las poblaciones de más de 70 países; así mismo la espirulina en 2005 se incorporó al informe del Instituto Intergubernamental para el Uso de las Microalgas Alimenticias contra la Malnutrición Aguda en las Emergencias Humanitarias y para el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el cual avalan, apoyan y recomiendan la utilización de la espirulina para corregir estados nutricionales, convirtiéndose en uno de los pocos productos alimentarios (sino el único) en ser reconocido completamente y propuesto como una posible solución definitiva a los problemas alimentarios mundiales y para el desarrollo sostenible del planeta (ONU, 2005; Moorhead *et al.*, 2011).

Históricamente en México, el consumo de la espirulina se remonta a tiempos prehispánicos de acuerdo con cronistas españoles del siglo XVI, donde se relata que los indígenas que vivían en Tenochtitlan, capital del imperio Azteca, colectaban un alimento novedoso del lago de Texcoco y elaboraban una especie de pastel o tortilla a la cual llamaban "Tecuitlatl" que significa en náhuatl “comida de barro” (Koru, 2012; Blanco & Díaz, 2017; Espinoza, 2017).

En la década de los sesenta del siglo XX, el renacimiento de las granjas de producción de espirulina en México se produjo en el lago de Texcoco por un curioso accidente, en donde la empresa Sosa Texcoco S.A., dedicada inicialmente a la extracción de carbonato de sodio de las aguas alcalinas del lago, reportó una espesa capa verdeazulada en la superficie de los

estanques del lago, cuyo crecimiento era desconocido para sus acuicultores (Challem, 1981; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006); como producto de estos redescubrimientos y de investigaciones de instituciones nacionales e internacionales como el Instituto Francés del Petróleo, la empresa instaló una planta de procesamiento en las orillas del Caracol del lago de Texcoco con una producción cercana a las 500 toneladas de espirulina seca al año, convirtiéndose así en la más importante empresa en lo que se refiere a la producción de estas cianobacterias a nivel mundial hasta la década de los noventa (Sasson, 1997).

Actualmente, aunque Sosa Texcoco cerró sus puertas en 1993 por un problema sindical, afectando severamente al empleo, la comercialización y la divulgación de los nutrimentos de este alimento (Gracia-Fadrique, 2017); en el lago de Texcoco y pueblos aledaños al Valle de México como lo es San Salvador Atenco, se encuentra y se sigue cultivando la espirulina; sin embargo la producción local enfrenta la problemática de no cubrir la demanda por insuficiencia de producción, por eso es de suma importancia contar con un manual para el cultivo artesanal de este alimento, donde se brinde información detallada sobre los procesos de producción, factores fisicoquímicos de importancia; así también, procedimientos legales para la comercialización de este recurso, contribuyendo a una fuente de aprovechamiento para el emprendimiento y empleo que beneficie económicamente a la población de la zona.

Revisión de Literatura.

San Salvador Atenco es la cabecera del municipio de Atenco en el Estado de México (García-Villalpando, 2018). El municipio de Atenco con una superficie de 83.80 Km² está ubicado al oriente del Estado de México, su localización geográfica está entre los 19°29'20" y 19°36'34" de latitud norte; 98°53'38" y 99°00'47" de longitud oeste, a una altura de 2,250 metros sobre el nivel del mar; limita al norte con Acolman y Tezoyuca, al sur con Nezahualcóyotl y Chimalhuacán, al este con Texcoco y con Chiautla y Chiconcuac, al oeste con Ecatepec y Nezahualcóyotl (Mora-Cervantes, 1997; Sánchez-Gómez, 1999).

El territorio del municipio se encuentra ubicado en el oriente de la cuenca lacustre, que está situado en el Eje Neovolcánico que cruza la República Mexicana, cuenta con una porción

de tierra salitrosa al sur y occidente del municipio que originalmente pertenecían a parte del subsuelo del lago de Texcoco (Mora-Cervantes, 1997).

El municipio cuenta con una población de 75,489 habitantes de los cuales 37,052 son hombres y 38,437 mujeres; cuenta con una población económicamente inactiva de 19,503 habitantes y su principal actividad económica es la agricultura (INEGI, 2010).

Históricamente, y hasta el presente, la espirulina ha sido una especie útil para la alimentación de diferentes poblaciones humanas y ha sido comúnmente consumida y comercializada en algunas localidades de África (Chapman, 1970), y de México desde antes de la conquista de los españoles (Fogg *et al.*, 1973).

En México el cultivo y comercialización de la espirulina tuvo auge en la década de los años sesenta con la creación de la empresa Sosa Texcoco S.A. a la cual se le consideró la empresa de mayor importancia de cultivo de esta cianobacteria en el mundo hasta la década de los noventa, generando más de 2 mil empleos que beneficiaron a los habitantes del municipio de Ecatepec y de zonas aledañas, de igual forma benefició a pequeños productores dada a la gran demanda que exigía el mercado (Gracia-Fadrique, 2017).

Aunque actualmente a la espirulina se le considera un superalimento y cuenta con la recomendación de consumo en dietas para el combate de la malnutrición por diversas instancias de salud tanto nacionales como internacionales, y aunque han existido incentivos y apoyos del parte del gobierno, la producción local enfrenta la problemática de no cubrir la demanda por insuficiencia de producción (Shamosh-Halabe, 2009).

Objetivo.

La presente investigación pretende elaborar un manual informativo-gráfico para el cultivo artesanal de espirulina (*Arthrospira* spp.) a través de recopilación bibliográfica, como una opción de emprendimiento para los habitantes de San Salvador Atenco.

Objetivos particulares.

- Generar un manual con la información necesaria para la realización del cultivo de la cianobacteria espirulina (*Arthrospira* spp.), incluyendo la caracterización de la especie,

su importancia, requerimientos de instalaciones, maquinaria, personal, tipo de nutrientes, entre otros, para lograr un óptimo aprovechamiento y desarrollo.

- Realizar una campaña de difusión del manual en diferentes redes sociales como son Facebook, Twitter, etc.; a través de artículos y/o carteles en páginas o grupos relacionadas a la zona de estudio o especializados en la divulgación de las ciencias; o si es favorable la evolución de las circunstancias de la pandemia del COVID 19 y la universidad lo permite, se hará difusión a través de medios locales (reparto de folletos, trípticos, exposiciones informativas, etc.), para que se incentive a los habitantes de San Salvador Atenco el cultivo artesanal de espirulina como una fuente de emprendimiento y generador de empleo.

Metodología.

Debido a las circunstancias de la pandemia del COVID 19 se realizó de forma remota una exhaustiva recopilación bibliográfica de artículos científicos, bases de datos, libros, entre otros; para la búsqueda la mejor alternativa para la elaboración del manual y para la difusión de su información. Toda la investigación fue citada con base en el formato de estilo APA de la Guía de Normas APA 7^a edición <https://normas-apa.org/wp-content/uploads/Guia-Normas-APA-7ma-edicion.pdf>.

Resultados.

A través de la exhaustiva recopilación bibliográfica, se desarrolló un manual informativo-gráfico con 9 capítulos con diversos subcapítulos los cuales se presentan a continuación, de igual forma con toda esta información se realizó conferencias con público interesado en el tema y repartición de trípticos (**Anexos**).

Capítulo I: Biología de la espirulina (*Arthrospira* spp.).

Taxonomía y caracterización: *Arthrospira* Sitzenberger ex Gomont 1892, es un género de cianobacterias procariontes verdeazuladas, multicelulares, filamentosas, del orden Oscillatoriales (**Tabla 1**) (**Imagen 1**) (Guiry & Guiry, 2015). Las especies de este género son organismos autótrofos fotosintéticos cuyo principal pigmento es la ficocianina, que es el pigmento que les da el color verdeazulado que las caracteriza (Tarazona-Díaz, 2018).

Estas bacterias también contienen clorofila a, carotenoides y algunas pueden contener un pigmento llamado ficoeritrina, dando a las bacterias un color rojo o rosado (FAO, 2008). Las principales características que diferencian este género de otros similares (**Tabla 2**) es que están formadas por filamentos cilíndricos multicelulares enrollados en forma helicoidal cuyas células tienen un ancho de 2.5 a 12 μm llegando a veces a 16 μm , sus tricomas (filamentos) tienen un patrón de arreglo en forma de hélice abierta y llegan a medir 100 a 200 μm o hasta 500 μm (Sánchez *et al.*, 2003; Antenna, 2005; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006), además cuentan con la presencia de paredes o septos intercelulares (Fernández-Honores *et al.*, 2019).

Tabla 1. Clasificación taxonómica del género *Arthrospira* (Guiry & Guiry, 2015).

Dominio:	Prokaryota
Reino:	Eubacteria
Subreino:	Negibacteria
Filo:	Cyanobacteria
Clase:	Cyanophyceae
Subclase:	Oscillatoriophyceae
Orden:	Oscillatoriales
Familia:	Microcoleaceae
Género:	<i>Arthrospira</i>

Tabla 2. Principales características del género *Arthrospira* (Vonshak & Tomaselli, 2000; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006; Maza *et al.*, 2017).

Carácter	<i>Arthrospira</i>
Diámetro del tricoma:	2.5-12 (16) μm .
Tipo de hélice:	Hélice abierta.
Septos:	Visibles en microscopio óptico.
Patrón de los poros de la pared celular:	Una fila alrededor del tricoma.
Tipo de fragmentación:	Intracelular (necridio).
Cuerpos cilíndricos:	Presente.
Fotosíntesis oxigénica:	Presente.
Ficoeritrina:	Presente en algunas especies.
Ácido γ -linolénico (GLA):	Presente.

Especies: El género *Arthrospira* incluye actualmente 44 especies de acuerdo con la base de datos AlgaeBase (**Tabla 3**), así como 12 nombres intraespecíficos. De los nombres de especies en dicha base, 26 han sido marcados como aceptados taxonómicamente con base en la literatura enumerada bajo el nombre de la especie. En algunos casos, las opiniones sobre la validez taxonómica difieren de un autor a otro. Algunas de estas especies tienen

una importancia comercial, nutricional e industrial como lo son *Arthrospira jenneri* y *Arthrospira maxima*.

Tabla 3. Especies del género *Arthrospira* (Guiry & Guiry, 2015).

Especie	Validez del nombre científico
<i>Arthrospira amethystina</i> (H.F.Buell) J.De Toni	C
<i>Arthrospira ardissoni</i> Forti	C
<i>Arthrospira argentina</i> (Frenguelli) Guarrera & Kühnemann	C
<i>Arthrospira balkrishnani</i> N.D.Kamat	C
<i>Arthrospira baryana</i> Stizenberger	U
<i>Arthrospira braunii</i> Forti	U
<i>Arthrospira breviararticulata</i> Setchell & N.L.Gardner	S
<i>Arthrospira brevis</i> (Kützing) Drouet	S
<i>Arthrospira brevis</i> Wang	C
<i>Arthrospira curta</i> Lemmermann	S
<i>Arthrospira desikacharyensis</i> Vasishta	C
<i>Arthrospira erdosensis</i> unknown authority	U
<i>Arthrospira funiformis</i> Vouk	S
<i>Arthrospira fusiformis</i> (Voronichin) Komárek & J.W.G.Lund	S
<i>Arthrospira gigantea</i> (Schmidle) Anagnostidis	C
<i>Arthrospira gomontiana</i> Setchell	C
<i>Arthrospira indica</i> Desikachary & N.Jeeji Bai	S
<i>Arthrospira jenneri</i> Stizenberger ex Gomont	C
<i>Arthrospira joshii</i> Vasishta	C
<i>Arthrospira khannae</i> Drouet & Strickland	C
<i>Arthrospira laxa</i> (G.M.Smith) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira laxissima</i> Setchell	C
<i>Arthrospira leopoliensis</i> Raciborski	S
<i>Arthrospira major</i> (Kützing ex Gomont) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira margaritae</i> (Frémy) Gomont ex Anagnostidis & Komárek	C
<i>Arthrospira massartii</i> Kufferath	C
<i>Arthrospira maxima</i> Setchell & N.L.Gardner	S
<i>Arthrospira meneghiniana</i> (Zanardini ex Gomont) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira miniata</i> Gomont	C
<i>Arthrospira neapolitana</i> (Kützing ex Gomont) F.E.Drouet	S

<i>Arthrospira nordstedtii</i> (Gomont) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira oceanica</i> W.B.Crow	S
<i>Arthrospira okensis</i> K.I.Meyer	S
<i>Arthrospira pellucida</i> Chu Chia Wang	C
<i>Arthrospira platensis</i> Gomont	C
<i>Arthrospira santannae</i> Komárek & Komárková-Legnerová	C
<i>Arthrospira setchellii</i> De Toni	S
<i>Arthrospira skujae</i> A.G.E.Magrin, P.A.C.Senna & J.Komárek	C
<i>Arthrospira spirulinoides</i> Ghose	S
<i>Arthrospira subsalsa</i> (Oersted ex Gomont) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira subtilissima</i> (Kützing) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira tenuis</i> Brühl & Biswas	C
<i>Arthrospira tenuissima</i> (Kützing) W.B.Crow	S
<i>Arthrospira versicolor</i> (Cohn ex Gomont) W.B.Crow	S

Nota: “C” indica un nombre que se acepta taxonómicamente; “S” un sinónimo homotípico o heterotípico; “U” indica un nombre de estatus taxonómico incierto, pero que ha sido sujeto a alguna verificación de nomenclatura.



Imagen 1. Imagen ilustrativa del género *Arthrospira* tomada a través de microscopio óptico a 20 µm y 100 µm en el laboratorio de Ficología y Fitofarmacología de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco.

Reproducción: Un aspecto fundamental de la biología de la espirulina es su ciclo de reproducción, en donde todas las células dispuestas en filamentos tienen la facultad de multiplicarse por bipartición (Rodríguez-Cuesta & Triana-Serrano, 2006). La multiplicación ocurre solo por fragmentación y la fragmentación del tricoma es intracelular, involucrando la destrucción de la célula intercalar (Vonshak & Tomaselli, 2000; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006). Este es un proceso que se puede resumir en tres etapas fundamentales:

1. Fragmentación de los tricomas.

2. La ampliación de células del hormogonio y procesos de maduración.
3. Alargamiento de tricoma.

El tricoma maduro se divide en varios filamentos u hormogonios pequeños, gracias a la formación previa de células especializadas, las llamadas células de necridio, que se caracterizan por tomar un aspecto granuloso, sus tabiques transversales se abomban fuertemente y la célula se vuelve bicóncava, la materia de la célula se reabsorbe para permitir la fragmentación (Rodríguez-Cuesta & Triana-Serrano, 2006). En las zonas donde ocurre la ruptura celular se conocen como disyuntores. Después de este proceso, el tricoma crece longitudinalmente y toma su forma típica helicoidal (Berry, *et al.*, 2003; Rodríguez-Cuesta & Triana-Serrano, 2006; Des Abbayes, 2021).

Ecología: La mayoría de las especies del género *Arthrospira* se han encontrado en cuerpos de agua alcalinos (>30 g/l), con un pH alto (8.5–11.0) y a temperatura promedio de 25 a 35°C con alto nivel de radiación solar, principalmente en regiones tropicales o semitropicales, donde crecen de forma masiva y donde es difícil o imposible para otros microorganismos desarrollarse (Kebede & Ahlgren, 1966; Castenholz, 1989; Pedraza, 1989; FAO, 2008).

Sin embargo, algunas especies se encuentran presentes en cuerpos de agua dulce como ríos, manantiales y estanques, y aunque no hay reportes para el ambiente marino, con un adecuado suplemento de HCO_3^- , Na y K en conjunto con pH y salinidad adecuados, las especies de *Arthrospira* pueden ser altamente productivas en agua de mar (Vonshak & Tomaselli, 2000; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006).

Capítulo II: Composición bioquímica y propiedades nutricionales de la espirulina.

Las principales especies de espirulina cultivadas para consumo alimenticio de acuerdo con la revisión bibliográfica son *Arthrospira jenniferi*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*, donde se les ha brindado el beneficio de aportar energía y numerosos macronutrientes y micronutrientes para el ser humano (Fernández-Honores *et al.*, 2019; De Souza da Silva, 2021; Martelli *et al.*, 2021). Se le atribuyen muchas propiedades, por ejemplo: propiedades anticancerígenas, refuerza el sistema inmunitario, actúa como

antioxidante, controla la diabetes, el colesterol, la anemia, favorece la eliminación de los metales pesados y la radioactividad, ayuda a la recuperación del esfuerzo físico, combate la fatiga y el estrés, entre otros (Xarxa, 2016).

Estas cianobacterias son una fuente rica en proteínas, aminoácidos, vitaminas, minerales y otros nutrientes (**Tabla 4**), por lo que uno de sus principales usos es como suplemento alimenticio, ya sea en polvo, encapsulado, en tabletas, como sustituto de harina (adicionando diferentes sabores), en pastas para sopa, botanas, salsas, barras de granola, golosinas o bebidas instantáneas de frutas o vegetales (Sasson, 1997; Henrikson, 2010; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006).

Tabla 4. Composición bioquímica del género *Arthrospira* (Cohen, 1997; Sasson, 1997; Sánchez *et al.*, 2003; Ramírez-Moreno & Olvera-Ramírez, 2006).

	Compuesto	Contenido (%)
<Proteínas 50-70%	Leucina	5.9-6.5
	Valina	7.5
	Isoleucina	6.8
	Lisina	2.6-3.3
	Fenilalanina	2.6-3.3
	Metionina	1.3-2.0
	Triptófano	1.0-1.6
	Tirosina	2.6-3.3
	Ácido glutámico	7.3-9.5
	Ácido aspártico	5.2-6.0
	Cisteína	0.5-0.7
	Vitaminas	Provitamina A
Tiamina B1		3-4 mg
Riboflavina B2		2.5-3.5 mg
Niacina B3		0.014 mg
Vitamina B6		0.5-0.7 mg
Cobalamina B12		0.15-0.25 mg
Vitamina E		5-7 mg
Vitamina K		2.2 mg
Ácido fólico		4-5 mg
Ácido pantoténico		0.5-0.8 mg
Biotina		5 µg
Ácidos grasos 3-6.5%	Ácido mirístico	0.23
	Ácido palmítico	44.6-54.1
	Ácido palmitoleico	1.26
	Ácido γ-linoleico (GLA)	8-32
	Ácido linoleico	11-31
	Ácido oleico	1-15.5
	Otros	20.88

<i>Minerales 7%</i>	Potasio	1-14 mg
	Sodio	0.45-0.50 mg
	Fósforo	0.3-0.7 mg
	Calcio	0.1-0.4 mg
	Magnesio	0.1-0.2 mg
	Fierro	0.03-0.05 mg
	Manganeso	0.005 mg
	Zinc	0.003 mg
	Cobre	0.0012 mg
	Cromo	0.28 mg
	<i>Carbohidratos 15-20%</i>	Glicerol
Glucosa		7.5
Ramnosa		17.1
Fucosa		3.3
Ribosa		8.1
Xilosa		4.5
Manosa		1.9
Galactosa		8.2
D-Glucosamina		2.12
No identificados		2.6
<i>Pigmentos 6%</i>		Clorofila a
	Carotenoides	0.648
	β -caroteno	15
	Equinenona	11-13
	b-criptoxantina	6-8
	3'-hidroxiequinenona	7-11
	Zeaxantina	25
	Diatoxantina	5
	Cantaxantina	5
	Mixoxantofila	13-17
	Oscillaxantina	3-5
	No identificados	3-4
	Ficocianina	16-20

Nota: porcentaje (%) con base al peso seco de la biomasa.

Proteínas: La espirulina contiene cantidades inusualmente altas de proteínas, entre 55 y 70 por ciento por peso seco, dependiendo de la fuente bibliográfica consultada y de la especie (Phang *et al.*, 2000; FAO, 2008). Es una proteína completa, que contiene todos los aminoácidos esenciales, aunque con cantidades reducidas de metionina, cistina y lisina, en comparación con las fuentes proteínicas comunes como la carne, los huevos o la leche; es, sin embargo, superior a todas las fuentes proteínicas vegetales como las de las legumbres (FAO, 2008).

Vitaminas: La espirulina contiene vitamina B1 (tiamina), B2 (riboflavina), B3 (niacina), B6 (piridoxina), B9 (ácido fólico), B12 (cianocobalamina), vitamina C, vitamina D, vitamina E y vitamina K (FAO, 2008).

Ácidos grasos esenciales: La espirulina tiene una gran cantidad de ácidos grasos poliinsaturados (1.5 a 2.0 por ciento de su peso), frecuentemente denominados por su acrónimo en inglés PUFA y de 5 a 6 por ciento de lípidos totales (FAO, 2008). De los ácidos grasos presentes los que se encuentran en mayor proporción son los ácidos palmíticos, γ -linoleico (GLA), linoleico y oleico, pero el que más importancia tiene es el GLA, un ácido graso insaturado esencial, que rara vez está presente en la dieta diaria, donde *Arthrospira* spp. contiene una mayor concentración de GLA a comparación de otras fuentes alimenticias (Cohen, 1997).

El GLA es un ácido graso estructural, ya que es un importante componente de la membrana celular, y también es precursor de las prostaglandinas; de igual forma reduce en cierta medida la cantidad de colesterol en la sangre por lo que representa una alternativa en el manejo de enfermedades cardiovasculares y en el control de peso (Sánchez *et al.*, 2003; Aires *et al.*, 2005). Ha sido utilizado para tratar el eccema y la mastalgia cíclica, una enfermedad marcada por dolor en los senos y asociado con el ciclo menstrual (Olenina *et al.*, 2014). Se piensa que tiene efectos positivos en el Parkinson y la esclerosis múltiple, así como en el crecimiento celular en la síntesis de la membrana celular (Cohen, 1997; Sasson, 1997).

GLA ha mostrado alguna promesa para el tratamiento de neuropatía diabética, una complicación de diabetes caracterizada por dolor y/o entumecimiento de piernas y pies debido al daño nervioso progresivo; no obstante, la evidencia de apoyo de que GLA sea efectivo para este uso todavía es bastante limitada (Olenina *et al.*, 2014).

Minerales: La espirulina es una rica fuente de potasio, y también contiene calcio, cromo, cobre, hierro, magnesio, manganeso, fósforo, selenio, sodio y zinc (FAO, 2008).

Pigmentos fotosintéticos: La espirulina contiene muchos pigmentos que incluyen clorofila a, xantofila, betacaroteno, equinenona, mixoxantofila, zeaxantina, cantaxantina,

diatoxantina, 3-hidroxiéquinenona, betacriptoxantina, oscillaxantina, más las ficobiliproteínas c-ficocianina y aloficocianina (FAO, 2008).

Capítulo III: Sistemas de cultivo.

Principales tipos de sistemas de cultivo: Los sistemas de cultivo se suelen clasificar según su configuración, tipo de funcionamiento y aplicación; hay una gran variedad de sistemas que se emplean para el cultivo de cianobacterias como la espirulina, (González, 2017; Maza *et al.*, 2017). Conociendo el destino del uso de la biomasa producida se pueden elegir las mejores características para el cultivo óptimo (Temperatura, pH, nutrientes, intensidad luminosa, entre otros) (Fernández-Sevilla, 2014; Acién *et al.*, 2017; González, 2017).

El cultivo intensivo de la espirulina puede realizarse en sistemas abiertos y sistemas cerrados, comúnmente denominados fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés) (Hernández-Pérez & Labbé, 2014; Maza *et al.*, 2017). Cada uno de los sistemas presenta una serie de ventajas e inconvenientes; en los sistemas abiertos el cultivo está expuesto a un mayor número de variables ambientales, si bien son sistemas con menor necesidad de inversión y mantenimiento, presentan un sistema de control más dificultoso, la producción es menor y con baja eficiencia, además de ser más susceptibles a contaminarse; por otro lado, en los sistemas cerrados o fotobiorreactores el cultivo tiene poco o nulo contacto con la atmósfera, son más seguros, con mejor control de operación, siendo el coste su principal inconveniente (Grobbelaar, 2000).

La elección del tipo de sistema de cultivo es compleja, siendo importante determinar el tipo y valor del producto final desarrollado a partir de la biomasa, además de la disponibilidad de recursos hídricos y/o suelo (Borowitzka 1999; Martínez 2008; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Sistemas abiertos: Son uno de los más comunes en la producción comercial; en esta categoría se encuentran los lagos y estanques naturales, como los que han sido explotados por centurias de pueblos antiguos, incluyendo el imperio azteca en las zonas lacustres del Valle de México; así también, por la empresa Sosa Texcoco S.A en el Caracol del lago de

Texcoco para la producción de la espirulina, los sistemas inclinados, los tanques circulares y los raceways (Barra-Galárraga, 2013).

Las ventajas de los sistemas abiertos radican en su bajo costo y facilidad de construcción y operación, así como en la alta durabilidad (De Godos *et al.*, 2009; Martínez, 2008; Rawat *et al.*, 2011; Abdel-Raouf *et al.* 2012; Hernández-Pérez & Labbé, 2014). Como desventajas encontramos la baja accesibilidad de las células a la luz, la evaporación, la necesidad de grandes extensiones de terreno y exposición a contaminación por parte de organismos heterótrofos de rápido crecimiento y/o plancton pastoreador (Contreras-Flores *et al.*, 2003; Martínez 2008; Posten, 2009; Park *et al.*, 2011a; Rawat *et al.*, 2011b; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Sistemas abiertos en aguas naturales: Comprende balsas, estanques, lagunas y lagos con una profundidad limitada donde las cianobacterias como el género *Arthrospira* crecen sin ningún elemento de control ambiental, expuestos a la contaminación y a los factores tales como la lluvia, el polvo, las aves, los insectos, etc.; generalmente para el cultivo en estos sistemas se buscan especies que puedan crecer bajo condiciones en las que otros organismos les resultaría difícil desarrollarse como pH altos, temperaturas específicas, requerimientos nutritivos específicos, entre otros (**Imagen 2**) (Posten, 2009; Barra-Galárraga, 2013).

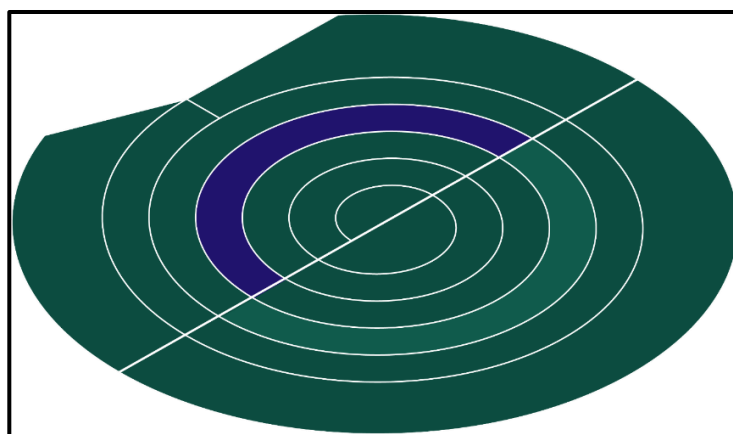


Imagen 2. Ilustración del Caracol de Texcoco. Cuerpo de agua donde se encuentra naturalmente la espirulina en el Valle de México.

Sistemas inclinados: En estos sistemas el cultivo se bombea por propia gravedad desde la parte baja hasta la parte alta de una superficie inclinada (González, 2017). Existe gran

interés en los sistemas inclinados debido a que en este tipo de sistemas se obtienen flujos altamente turbulentos con capas muy finas, lo que a su vez permite mantener altas concentraciones celulares y una alta relación superficie/volumen; las desventajas que han presentado estos sistemas son las altas tasas de evaporación, pérdida de CO₂, la sedimentación de las células en las partes donde la velocidad de flujo es menor y el alto requerimiento de energía que demanda bombear el cultivo durante todo el día (**Imagen 3**) (Barra-Galárraga, 2013).

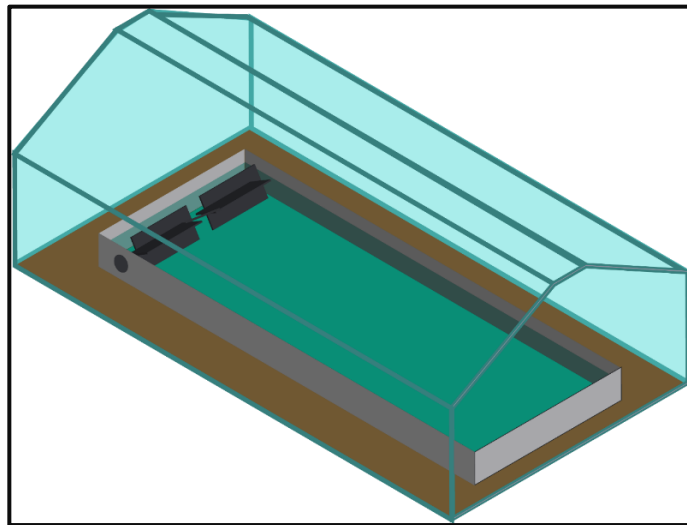


Imagen 3. Ilustración de un sistema inclinado de cultivo de espirulina.

Estanques circulares: Son sistemas en forma circular que se han dejado de utilizar de manera industrial debido a que presentan varios inconvenientes, como la superficie que ocupan, el elevado costo de construcción (suelen ser generalmente de hormigón) y el alto consumo de energía; en estos estanques la agitación se realiza mediante una pala que gira recorriendo toda la superficie (**Imagen 4**) (Sanz-Martínez, 2019).

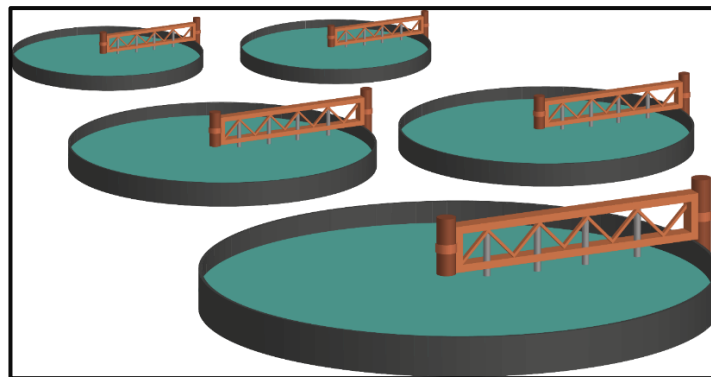


Imagen 4. Ilustración de un sistema circular de cultivo de espirulina.

Raceways: Son sistemas abiertos idóneos para producciones masivas de microalgas a bajo costo, pueden ser estanques con forma de pista ovalada que pueden ser construidos sobre el suelo con cualquier material que sea lo suficientemente resistente, su construcción es relativamente barata (**Imagen 5**) y los grandes productores de espirulina, entre ellos Earthrise Farms en California y Cianotech en Hawái los han utilizado por décadas (Barra-Galárraga, 2013). Las principales desventajas que tienen los raceways es que no pueden ser operados con niveles de agua superiores a los 15 cm debido a que niveles superiores pueden causar una gran reducción del flujo y de la turbulencia (Richmond, 2004). El uso de este tipo de capa en el cultivo obliga a trabajar con densidades celulares muy bajas, lo que hace que el cultivo sea muy susceptible a la contaminación y se incrementa considerablemente el costo de la cosecha; también hay grandes pérdidas por evaporación, sobre todo en climas cálidos, donde también el control de la temperatura es muy deficiente (Richmond *et al.*, 1990).

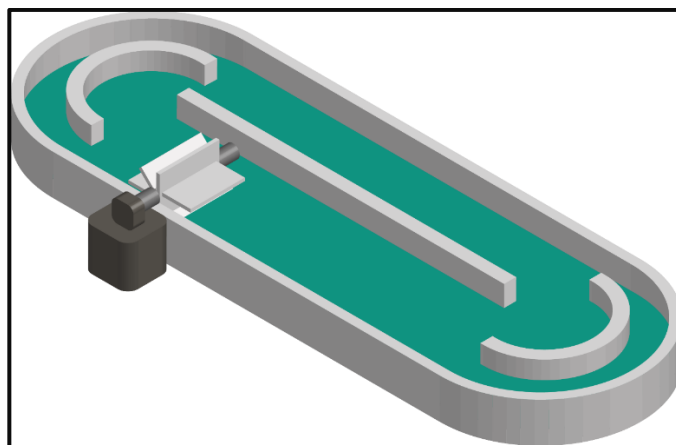


Imagen 5. Ilustración de un sistema Raceways empleado para el cultivo de espirulina.

Sistemas cerrados: El cultivo de la espirulina en sistemas cerrados se lleva a cabo por varios tipos de sistemas fotobiorreactores que incluyen reactores tubulares, reactores de placa planos o reactores de columna en los que es posible obtener condiciones controladas durante el desarrollo de los cultivos, evitando el intercambio de gases, contaminantes y permitiendo protegerlos de fenómenos ambientales dañinos, con lo que se logra mayores valores de densidad poblacional que aumentan el nivel y la rapidez de la productividad (Chisti, 1989; Xu *et al.*, 2009; Enzing *et al.*, 2014; Dogaris *et al.*, 2015; García, 2018). Frente a los sistemas abiertos, los sistemas cerrados presentan una mayor eficiencia en la utilización y fijación del CO₂, permiten mantener condiciones idóneas para el crecimiento a

la vez que dificultan la invasión por organismos contaminantes, posibilitando así el mantenimiento de monocultivos con valores de densidad celular más elevados que en los sistemas abiertos (Barra-Galárraga, 2013; Gonzáles, 2017).

Dependiendo de su forma o diseño, los fotobiorreactores pueden ser verticales u horizontales, esto varía dependiendo del espacio disponible o del propósito para el cual se utilicen (Gonzáles, 2017). En estos reactores la luz no se filtra directamente sobre la superficie del cultivo, sino que debe traspasar las paredes del sistema (Gonzáles, 2017). En términos industriales, los sistemas cerrados se consideran y utilizan por encima de los sistemas abiertos debido a la obtención de productos de alto valor añadido, la facilidad de tener control sobre las condiciones necesarias para la supervivencia y el crecimiento del cultivo (pH, temperatura, salinidad, CO₂, entre otros) y, por ende, un aumento en la producción de biomasa proveniente del cultivo (Gonzáles, 2017).

Todos los fotobiorreactores suelen tener el equipamiento necesario para el crecimiento de los cultivos: aireación, agitación, intercambio de gases, medio proporcionado a la velocidad adecuada, estabilización de pH, iluminación e intercambio de calor (Posten, 2009).

Fotobiorreactores tubulares: Son unos de los sistemas más sofisticados y de los más especializados, pero son también los más caros de construir (Fernández-Sevilla, 2014). Un fotobiorreactor tubular consiste generalmente de un arreglo de tubos transparentes adoptando distintas configuraciones (serpentín, espiral, horizontales, disposición vertical, entre otros), que usualmente están hechos de vidrio o policarbonato debido a su resistencia, transparencia y durabilidad (**Imagen 6**) (Rubio *et al.*, 1999; Vásquez & Brenes, 2014). Este arreglo de tubos se conoce como receptor solar y es donde la luz del sol se captura; los diámetros de los tubos normalmente rondan 1 metro o menos; esto se debe principalmente a que cuando la densidad de un cultivo aumenta, la luz del sol no penetra profundamente, lo cual se necesita para asegurar una alta productividad de biomasa (Vásquez & Brenes, 2014; Ruiz-Reyes, 2017). Algunos obstáculos son la poca transferencia de masa, altos niveles de pH y oxígeno en la mezcla, se requiere mantenimiento por los niveles de dióxido de carbono disueltos a lo largo de los tubos, además y requieren de grandes terrenos para la implementación (Piedrahita-Hernández & Urbano-Montes, 2012).

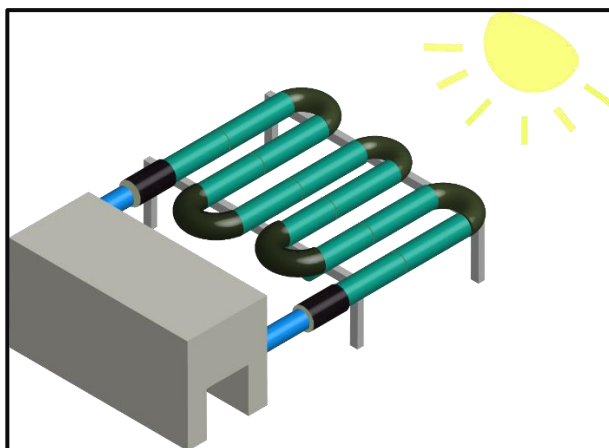


Imagen 6. Ilustración de un fotobiorreactor tubular en forma de serpentina empleado para el cultivo de espirulina.

Fotobiorreactores de placas planas: Los fotobiorreactores de placa plana o también denominados *flat plat reactors* (FPR), siguen un concepto de diseño simple que busca un uso eficiente de la luz (Gupta *et al.*, 2015). Están formados por paneles estrechos construidos para lograr una relación área a volumen alta, estas placas o paneles forman un sistema mediante la conexión de unas con otras que son utilizadas para introducir CO₂ y sustancias nutritivas al cultivo (**Imagen 7**) (Borowitzka, 1999). En general, las principales ventajas de estos fotobiorreactores son su alta productividad y una distribución uniforme de la luz (Greenwell *et al.*, 2009).

Pese a su aparente simplicidad pocos de estos sistemas han sido utilizados en el ámbito industrial, debido a la dificultad para controlar la temperatura del cultivo y al alto costo de los materiales transparentes comercialmente disponibles, tales como vidrio, láminas de PVC transparente o de policarbonato y también debido a la posibilidad de estrés hidrodinámico de los microorganismos en cultivo (Pulzl *et al.*, 1995; Piedrahita-Hernández & Urbano-Montes, 2012; Barra-Galárraga, 2013).

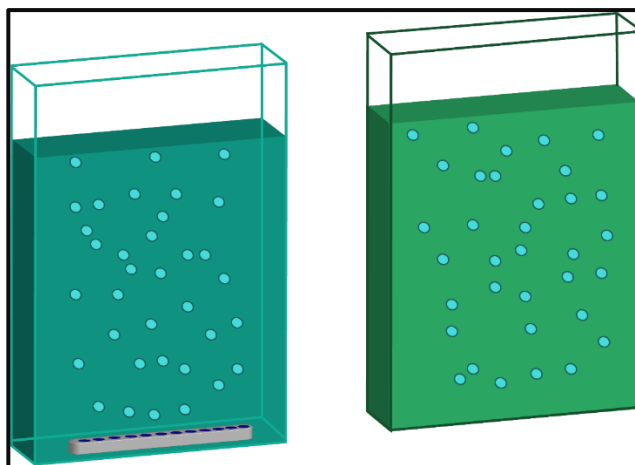


Imagen 7. Ilustración de un fotobiorreactor de placa plana empleado para el cultivo de espirulina.

Fotobiorreactores de columnas: Este tipo de fotobiorreactores cerrados, también conocidos como *airlift*, son sistemas de fácil construcción; consisten en una columna vertical de burbujeo de forma cilíndrica de un material transparente con un diámetro comprendido entre los 5 y los 50 centímetros, y de altura entre 1 y 4 metros en la cual la agitación y el intercambio de gases se realizan por la inyección de aire enriquecido en CO_2 por el fondo de la columna, lo cual implica una restricción de altura relacionada con la limitación en la transferencia de gases, así como con la resistencia de los materiales usados para la construcción de la columna (**Imagen 8**) (Ugwu *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2012; Sanz-Martínez, 2019). Gracias a su forma cilíndrica la luz se puede distribuir de forma más eficiente y se soporta bien la presión en la base; para realizar la agitación, se burbujea aire desde el fondo donde a través de esta corriente de aireación se produce la retirada del O_2 y el aporte de CO_2 (Sanz-Martínez, 2019).

La ventaja que ofrece estos sistemas es que el oxígeno no se acumula en el medio debido a la aireación, disminuyendo, así como la fotooxidación (Grima *et al.*, 2010). Una de las desventajas de este sistema es que la posición vertical produce que la luz solar incida con un ángulo mayor y el radio superficie/volumen es menor, aumentando la presencia de zonas oscuras (Acién *et al.*, 2017).

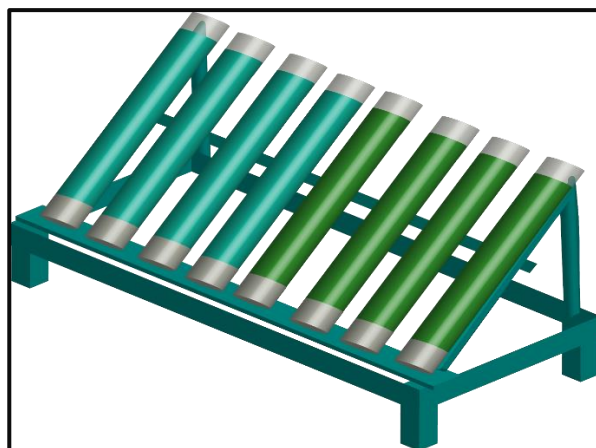


Imagen 8. Ilustración de un fotobiorreactor de columnas empleado para el cultivo de espirulina.

Capítulo IV: Técnicas de cosecha.

El proceso de cosecha de cianobacterias ha sido extensamente estudiado, con particular atención en las principales técnicas actualmente aplicadas como son la centrifugación, sedimentación por gravedad, filtración, tamizado, prensado, técnicas de floculación y flotación por aire que tienen como fin eliminar grandes cantidades de agua y recuperar grandes volúmenes de biomasa (Peralta-Ruiz *et al.*, 2012; Matter *et al.*, 2019). La elección de la técnica de cosecha en un cultivo de espirulina depende de las características de la especie, por ejemplo, tamaño, densidad y valor de los productos de destino (Olaizola, 2003). Las principales técnicas actualmente aplicadas en la etapa de cosecha se detallan a continuación.

Centrifugación: La centrifugación es un excelente método para la separación de la biomasa, ya que es rápido y eficaz, pero económicamente inviable para la recolección a gran escala al ocupar mucha energía y requerir de equipos especializados (Harun *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2011; Mendoza *et al.*, 2011; Hernández-Pérez & Labbé, 2014). Esta técnica es factible cuando el valor de los productos resultantes es elevado (Ho *et al.*, 2011; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

La centrifugación es más utilizada a nivel de laboratorio y ha demostrado que alrededor del 80-90% de lo cultivado puede ser recuperado por este sistema, pero, aunque la centrifugación genera altas eficiencias de recuperación, este método presenta algunas

desventajas como el daño en las estructuras de las células ante altas fuerzas gravitatorias (Knuckey *et al.*, 2006; Peralta-Ruiz *et al.*, 2012).

Sedimentación por gravedad: La sedimentación por gravedad depende de características como la densidad, el radio de las células de las especies a cultivo y de la velocidad de sedimentación (ley de Stokes) (Palomino *et al.*, 2010). Es un método común de recolección de biomasa que están diseñados para remover sólidos sedimentables pesados y partículas flotantes en el agua sin la adición de químicos y energía (Chen *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011^a; Abdel-Raouf *et al.*, 2012). Pese a que es rudimentario, se perfila como el más eficiente método en relación con su efectividad y costo de ejecución para diferentes cultivos (Ho *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011^b; Muñoz & Guieysse, 2006).

Filtración: La filtración convencional es un método simple que consiste en que el agua pasa por un medio filtrante que puede ser una membrana o cartucho con un tamaño de poro reducido que se encarga de separar la biomasa del agua (Brennan & Owende, 2010; Rodríguez-Robles, 2017). Es una técnica eficiente en la separación de células relativamente grandes (> 70 μm) como lo es la espirulina (Palomino *et al.*, 2010). A nivel industrial estos métodos tienden a ser costosos en energía, con reemplazos frecuentes de membrana y bombeo continuo de la biomasa (Rawat *et al.*, 2011; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Tamizado: Consiste en hacer pasar el cultivo por un tamiz, cedazo, colador o cernidor con orificios de menor tamaño a lo cultivado, de tal manera que, el agua pasa a través de los orificios de este, mientras que la biomasa permanece en él. Es un método simple y que generalmente se emplea para cultivos de menor escala o de manera artesanal, aunque se puede encontrar maquinaria para tamizado a nivel industrial como la que ofrece la empresa Virto-Cuccolini especialmente para el tamizado de la espirulina.

Prensado: También llamado compresión, es una operación simple que tiene por finalidad separar la biomasa comprimiéndola, permitiendo al agua fluir y salir mientras que la biomasa queda retenida entre las superficies compresoras (Fito-Maupoe, 2001).

Floculación: Dentro de los procesos más económicos, la floculación es una de las metodologías que conduce a sistemas para la recuperación de la biomasa con menor

consumo energético (Brennan & Owende, 2010; Schlesinger *et al.*, 2012; Vandamme *et al.*, 2013). La floculación convencional trabaja por el mecanismo de dispersión de carga, la adición de sales metálicas (como aluminio) hace que interactúen con la carga negativa de las células de las especies permitiendo la agregación (Abdel-Raouf *et al.*, 2012). De este modo, se puede combinar con sedimentación, filtración o flotación, haciendo estos procesos más eficientes (Rawat *et al.*, 2011). Sin embargo, los residuos de esta técnica hacen inviable su utilización cuando los productos necesiten cierto grado de pureza, en especial para alimentación (Mendoza *et al.*, 2011; Rawat *et al.*, 2011; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Flotación por aire: Los métodos de flotación se basan en la captura de las células de las especies en cultivo utilizando dispersión de microburbujas de aire y, por tanto, a diferencia de floculación, no requiere la adición de productos químicos u orgánicos (Wang *et al.*, 2008). Algunas cepas naturalmente flotan en la superficie del agua con el aumento del contenido en lípidos (Bruton *et al.*, 2009). A pesar de que los métodos de flotación han sido mencionados como un método de cosecha potencial, hay evidencia muy limitada de su viabilidad técnica o económica (Palomino *et al.*, 2010).

Capítulo V: Métodos para el secado de la biomasa.

El proceso de secado de la biomasa es otro paso crucial para determinar la calidad de los productos procedentes del cultivo de cianobacterias como *Arthrospira*, consiste en la deshidratación de las células de las cianobacterias aumentando la temperatura a través de varias fuentes de calor como el secado solar y otros métodos convencionales utilizados en la producción a gran escala de biomasa de cianobacterias como el secado por convección, secado por aspersion, liofilización, secado con rodillos/tambores, secado en lecho fluidizado y secado mediante radiación (Chen *et al.*, 2015). El objetivo fundamental de la operación del secado de la biomasa es reducir el contenido de humedad del producto a un nivel tal que prevenga el deterioro durante un cierto periodo de tiempo denominado en la literatura como “Periodo seguro de almacenamiento” (de su traducción “Safe storage period”) (Norton & Probert, 1984).

Secado solar: El secado de la biomasa procedente del cultivo de cianobacterias bajo la luz directa del sol en un área abierta se denomina secado solar y es considerado el método de secado más simple y económico; sin embargo, este método depende de un conjunto de variables atmosféricas propias del lugar del secado cómo la radiación directa, la radiación difusa incidente y la humedad relativa, además que requiere una gran superficie de secado, instalaciones para protección del producto y el tiempo de duración para completar el secado es generalmente mayor (Brennan & Owende, 2010; Vanegas & Hernández, 2018).

Se encuentran dos diferentes tipos de proceso de secado solar, el secado solar abierto (exposición solar directa) y el secado solar cerrado (exposición solar indirecta). El secado solar abierto consiste en poner a secar la biomasa en grandes superficies de área donde el sol los cubra, da como resultado un secado lento de los cultivos debido a la disminución de la insolación a lo largo del día, pero puede ser beneficioso en las regiones tropicales, donde la energía solar es abundante (Doucha *et al.*, 2005).

El secado solar cerrado consiste en métodos de deshidratación de la biomasa por exposición solar indirecta, generalmente requieren una temperatura de 35 a 60 °C durante unas 3 a 5 horas de secado para generar un secado final con contenido de humedad por debajo del 10%, obteniendo el cálculo de esta medición a través del uso de un humidímetro digital de harinas (Ho *et al.*, 2019). Dentro de las ventajas que presentan los secadores diseñados para operar mediante esta técnica se encuentran en que son eficaces y rentables, son funcionales en épocas de lluvias, la biomasa deshidratada presenta mejor calidad, y presentan una disminución apreciable del tiempo de secado, respecto a la exposición directa (Al-Juamily *et al.*, 2007; Vanegas & Hernández, 2018). Además de estas ventajas, los secadores solares indirectos permiten ser diseñados de acorde para un tipo específico de biomasa, es decir, implementando los principios de transferencia de calor y masa, termodinámica y dinámica de fluidos puede diseñarse un prototipo de secador solar indirecto conforme a las especificaciones del material que sea de interés (Al-Juamily *et al.*, 2007).

En los últimos tiempos, los secadores solares se han utilizado para el secado de la biomasa de cianobacterias para evitar sobrecalentamiento y para mejorar la eficiencia del secado (Gouveia *et al.*, 2016).

Secado por convección: El secado por convección o también denominado deshidratación algal por algunos autores (Jeevanandam & Danquah, 2020), consiste en utilizar aire caliente o un gas para secar la biomasa de las cianobacterias a través de la transferencia de calor por convección (Priego-Peña, 2018). Se determinan varios tipos de secado convectivo según la dirección del fluido que se introduzca por el colector: de flujo paralelo, en el cual el fluido y el producto húmedo (la biomasa) fluye en la misma dirección; de flujo cruzado, en el que el fluido cruza la capa de producto y, por último, a contracorriente, en el cual el fluido fluye en dirección contraria al producto (Priego-Peña, 2018).

Algunas de las maquinarias actualmente empleadas en este método son el túnel de secado convectivo (Simioni *et al.*, 2019), secador de banda transportadora continua (Hosseinizand *et al.*, 2017), y el secado en bandeja convectiva (Larrosa *et al.*, 2018). El secado por convección también puede conducir al sobrecalentamiento de la biomasa si la temperatura no es adecuadamente controlada (Jeevanandam & Danquah, 2020).

Secado por aspersion: El secado por aspersion es una técnica que permite la obtención de un producto en polvo a partir de la biomasa, su principio de operación se basa en la atomización del producto generando de esta forma pequeñas microgotas, las cuales al estar en contacto con una corriente de aire caliente (entre 150 a 300 °C) son pulverizadas (CIMA, 2014). El proceso de secado por aspersion afecta el color y las propiedades de textura de los productos de cianobacterias (Palabiyik *et al.*, 2018), de igual forma, es fundamental caracterizar los nutrientes que se pierden o retienen antes de que se utilice el secado por aspersion a gran escala en el secado de la biomasa de cianobacterias aunque generalmente pueden retener más nutrientes, especialmente proteínas, en comparación con el secado por convección (Chaiklahan *et al.*, 2018; Jeevanandam & Danquah, 2020).

Secado por liofilización: La liofilización consiste en eliminar el agua de un alimento a partir de la congelación, en lugar de aplicar calor, esto explica que se reserve para los productos con sustancias sensibles a las altas temperaturas, como las proteínas o las enzimas (Chavarrías, 2010). La liofilización puede preservar los contenidos biomoleculares de la biomasa de las cianobacterias sin alterar su pared celular (Jeevanandam & Danquah, 2020). Generalmente, los productos de las cianobacterias se congelan durante 24 h a -70 °C y son sometidos a liofilización durante 5 días (Wong & Cheung, 2001). La liofilización

ayuda en la conservación de la calidad nutricional de los productos en comparación con el secado al horno, y es adecuado para aplicaciones relacionadas con los alimentos funcionales (Bennamoun *et al.*, 2015).

Secado con rodillos/tambores: El secado mediante rodillos o tambores es uno de los métodos de secado más eficientes en términos de consumo de energía y, es muy efectivo para secar líquidos con una alta viscosidad o alimentos en forma de puré como son las biomásas de las cianobacterias (QuimiNet, 2009; Nicolò *et al.*, 2017; Fasaei *et al.*, 2018; Jeevanandam & Danquah, 2020). Consiste en que la biomasa se introduce en uno de los lados del dispositivo de secado y es agitado por las placas de esparcimiento al interior del rodillo o tambor, extendiendo la biomasa de manera uniforme a través del área de secado y exponiéndolo al flujo paralelo (o flujo opuesto) del aire caliente; la transferencia de calor es acelerada por la mezcla y permite que la humedad dentro de la misma se evapore rápidamente; al final del proceso, todo el material se desplaza por las placas a un lado de la secadora, donde el descargador libera el producto seco (Xianfeng, 2022).

Secado en lecho fluidizado: Los secadores de lecho fluido se usan en gran número de aplicaciones industriales debido a su gran capacidad, su bajo coste de construcción, su fácil operación y su alta eficiencia térmica (Prada-Díaz, 2014). Cuando las partículas requieren tiempos de secado específicos, o los materiales son muy delicados, como la biomasa de las cianobacterias, el tiempo de residencia y temperatura es importante y se debe controlar, en este caso se necesitarán lechos multietapas o lechos con distribuidores rotativos, ya que con un lecho de una sola etapa pueden existir partículas que atraviesan rápidamente el lecho sin que exista apenas contacto con el aire caliente (Prada-Díaz, 2014).

Secado mediante radiación: En ellos se aporta energía para el secado de la biomasa a través de ondas electromagnéticas, infrarrojos o microondas, pero no está muy extendido su uso a nivel industrial para el secado de la biomasa, pero sí para aplicaciones donde tiene gran importancia la calidad del producto (Sánchez-Fuentes Santos, 2016). Entre sus ventajas están que el secado es más rápido, se consigue un calentamiento uniforme, es más eficiente energéticamente y existe un mejor control del proceso (Sánchez-Fuentes Santos, 2016).

Capítulo VI: ¿En qué consiste un cultivo artesanal de espirulina?

Se le denomina cultivo artesanal de espirulina, al cultivo de especies de *Arthrospira* como pueden ser *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis* de una manera de producción no industrial que involucran técnicas y maquinarias simples y económicas al alcance de cualquier algocultor, permitiéndoles comercializar y difundir el cultivo en zonas locales.

Las empresas dedicadas a la producción artesanal de espirulina son generalmente microempresas que se caracterizan por una plantilla laboral no mayor de 10 trabajadores, con sistemas de cultivo abiertos en lagos o estanques naturales o invernaderos con sistemas de cultivo estilo raceways, con cosecha mediante filtración, tamizado o prensado y secado de biomasa mediante la radiación solar directa o indirecta.

Aunque el cultivo artesanal de espirulina parezca simple y la producción sea a una escala menor a la industrial, no quiere decir que el producto final es de una baja calidad a comparación de los productos industriales; dado que para su comercialización para alimentación de forma legal se necesita permisos de parte de instancias gubernamentales que certifican la calidad y sanidad de los productos como más adelante lo abordaremos.

Capítulo VII: Parámetros fisicoquímicos para el cultivo artesanal de espirulina.

Calidad del agua: Para el cultivo de la cianobacteria espirulina debe de utilizarse agua de buena calidad, potable y sin cloro, ya sea de lluvia o de manantial preferentemente; si se ocupa agua de lluvia o de manantial se debe considerar estrategias para el control por contaminación bacteriológica y de otros patógenos, mientras para la dechloración del agua procedente del grifo se pueden utilizar filtros de carbón activado o dejarla por 24 horas a la intemperie para que el cloro se evapore (Indesol, 2016; Xarxa, 2016). De igual forma se puede lograr el cultivo utilizando agua de mar (1 litro de agua de mar por 2 litros de agua dulce) considerando los niveles de salinidad (Xarxa, 2016).

pH del agua: El nivel ideal del pH para el buen crecimiento de la espirulina es de 10.5, aunque puede sobrevivir en un pH aún mayor de 11.5, mientras con pH menores el crecimiento poblacional es retardado y con baja densidad (Bionutrec, 2014; Indesol, 2016).

El pHmetro es el instrumento que se emplea para medir los niveles de pH en el cultivo y debe ser ajustado una vez por semana (TechnAp, 2005). Sí el pH es demasiado alto, se puede aumentar la concentración de CO₂ o agregando al medio una solución orgánica, la cual consiste en agregar de manera lenta y muy cuidadosa jugo de limón o vinagre para ajustarlo, o de igual forma se puede agregar también soluciones químicas reguladoras de pH para el uso acuícola ((Indesol, 2016; Xarxa, 2016).

Nivel del agua: La concentración del agua en un cultivo de espirulina es de suma importancia dado que es un factor que está relacionado con la disponibilidad de la luz para los filamentos algales, cosa que afectará la utilización del CO₂ (Bionutrec, 2014). El nivel del agua en el estanque debe mantenerse alrededor del nivel deseado, la evaporación puede compensarse agregando agua y el exceso de agua por diversos factores como por la caída de lluvias en sistemas abiertos, puede ser modificado vaciando una parte del medio para luego agregar los nutrientes contenidos en el volumen del medio arrojado (TechnAp, 2005).


Concentración de espirulina: La concentración de espirulina presente en el medio es un parámetro clave, el cual es muy fácil de observar con el espirulímetro (disco de Secchi) (Xarxa, 2016). El espirulímetro o también conocido como disco de Secchi consiste en una escala graduada y al inicio de esta un fondo blanco, funciona sumergiéndolo en el agua y anotando los centímetros que ha descendido hasta que se deja de ver el fondo blanco, los centímetros que ha descendido indican la turbidez del agua, y en este caso también indica la concentración de espirulina (**Tabla 5**) (Xarxa, 2016).

Tabla 5. Equivalencia en gramos de espirulina seca por cada centímetro que desciende el espirulímetro (Xarxa, 2016).

Centímetros descendidos	1	2	3	4
Concentración (g seca/ L)	1	0,45	0,28	0,20

La concentración de espirulina afecta directamente a varios parámetros del cultivo, como por ejemplo la productividad, estabilidad y calidad de este; lo recomendable es mantener el espirulímetro entre los valores de 2 y 3 cm, cuanto más nos alejamos de estos valores, más se ven afectados los parámetros anteriores (**Tabla 6**) (Xarxa, 2016).

Tabla 6. Estado del cultivo de espirulina de acuerdo con el espirulímetro (Xarxa, 2016).

Espirulímetro	Velocidad de producción	Estabilidad	Calidad	¿Qué hacer?
	Rápida	Baja	Poca ficocianina	Necesita más sombra y más agitación.
	Lenta	Elevada	Alto contenido de ficocianina	Recolectar / Añadir medio de cultivo.

Luz: La espirulina es una cianobacteria bastante sensible a la luz, sobre todo si se somete a una exposición prolongada (Bionutrec, 2014). La iluminación es indispensable para el crecimiento de la espirulina a través de la fotosíntesis, pero la exposición prolongada mayor a 12 horas al día es perjudicial para su crecimiento y desarrollo, siendo preferente la exposición del cultivo a media sombra para el mejoramiento de su calidad (con más sombra más ficocianina), de igual forma la exposición prolongada al sol de la espirulina provoca que sus filamentos sean destruidos por fotólisis; de aquí la necesidad de agitar correctamente el cultivo (TechnAp, 2005; Xarxa, 2016). Durante la noche, hay reacciones bioquímicas que se continúan produciéndose en la espirulina, como la síntesis de proteínas y la respiración (TechnAp, 2005).

La iluminación en sistemas cerrados o sistemas que cuenten con un sistema de control más rígido, la iluminación y el calentamiento pueden provenir de fuentes artificiales para hacer crecer la espirulina, como la utilización de tubos de neón o LED implementados para iluminar o las lámparas ordinarias, que tienen la ventaja de calentar al mismo tiempo que iluminar (TechnAp, 2005; Indesol, 2016).

Agitación: Es necesaria para repartir la iluminación, la temperatura y los nutrientes en el cultivo, para estimular la formación de nuevos filamentos, así como para prevenir que la espirulina se acumule en la superficie y en el fondo del estanque, evitando la fermentación anaeróbica de los depósitos orgánicos (TechnAp, 2005; Xarxa, 2016). Puede hacerse mediante una bomba de aire, una bomba de agua o manualmente (Xarxa, 2016). Es muy recomendable el uso de un interruptor temporizado, que ponga en marcha la agitación en los momentos de máxima radiación solar, pudiendo funcionar en intervalos de 15 o 30

minutos o de 1 a 3 horas al día, a fin de obtener un mayor rendimiento fotosintético (Indesol, 2016; Xarxa, 2016). La agitación no es recomendable en las noches o cuando el clima está frío (temperaturas menores a 15°C) (Indesol, 2016).

Temperatura: La temperatura es un factor determinante para el crecimiento y desarrollo de la espirulina (Bionutrec, 2014). La espirulina es un organismo mesofílico (20-37°C) cuya velocidad de multiplicación o crecimiento aumentará con la temperatura hasta un punto crítico, luego del cual los filamentos se destruyen rápidamente (Bionutrec, 2014). En condiciones controladas y régimen de luz de 12 a 24 horas, entre los 22 y 32°C la velocidad de crecimiento puede ser exponencial, pudiendo crecer su tamaño en un 25% cada día; la velocidad de crecimiento comienza a disminuir entre los 32 y 40°C y su crecimiento es prácticamente nulo con temperaturas menores a los 20°C (Bionutrec, 2014; Indesol, 2016). Mantener una temperatura más elevada de los 40°C lleva a la destrucción del cultivo (Bionutrec, 2014; Xarxa, 2016).

Salinidad: La salinidad total no debe sobrepasar de 25g/L, siendo la concentración óptima de 10g/L, se trata de los iones: sulfato, cloruro, nitrato y sodio (TechnAp, 2005; Xarxa, 2016). La medición de la salinidad en el cultivo se lleva a cabo mediante un densímetro salinómetro o hidrómetro de sal o salmuera calibrado (TechnAp, 2005).

CO₂: El mayor elemento nutritivo en un cultivo artesanal de espirulina es el carbono, que se puede obtener a través del aire, fijando el dióxido de carbono (CO₂) en el proceso de fotosíntesis, alimentándose y contribuyendo al mismo tiempo a fijar gases de efecto invernadero (TechnAp, 2005; Xarxa, 2016). Como el aire contiene bajas concentraciones de CO₂, la absorción de éste corresponde a una productividad máxima (cuando el pH llega a 11) de 4 g de espirulina por día y por m² de estanque (TechnAp, 2005). Es posible inyectar CO₂ suplementario para aumentar la productividad, bajo la forma de gas de fermentación alcohólica o de una botella de CO₂ líquido: el gas burbujea en el medio de cultivo debajo de un plástico con soporte de madera (con superficie alrededor de 4 % de la del estanque) que lo retiene como una campana durante el tiempo que tarde en disolverse (TechnAp, 2005). Una dosis de CO₂ conveniente es de 1 kg por 1 kg de espirulina producida (TechnAp, 2005).

Nutrientes: Para el cultivo de espirulina, la espirulina se alimenta de nutrientes que se pueden clasificar en macronutrientes (carbono, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, fósforo, sodio, azufre) y micronutrientes (hierro, zinc, cobre, níquel, cobalto, etc.), todos estos elementos son aportados por sus respectivas sales que se disuelven en el agua (Bionutrec, 2014). Cuando la espirulina se queda sin nutrientes (ya sea carbono, nitrógeno, fósforo o hierro) la multiplicación de la espirulina se detiene (Xarxa, 2016).

Para un sencillo cultivo artesanal de la espirulina los nutrientes que se necesitan son bicarbonato de sodio, sal marina, cenizas, hierro y urea, pudiéndose generarse el siguiente medio de cultivo (**Tabla 7**) (Indesol, 2016).

Tabla 7. Receta para la preparación de un medio de cultivo para el crecimiento y desarrollo de la espirulina de forma orgánica y artesanal (Indesol, 2016).

	1 litro	10 litros	20 litros	100 litros
Agua	1 litro	10 litros	20 litros	100 litros
Bicarbonato de sodio	10 g	100 g	200 g	1 kg
Sal de mar	5 g	50 g	100 g	500 g
Hierro	2 ml	20 ml	40 ml	200 ml
Urea	10 ml	100 ml	200 ml	1 L
Agua de cenizas	20 ml	200 ml	400 ml	2 L

Tamaño de inóculo: El tamaño del inóculo (concentración) es un factor de gran importancia en el cultivo de la espirulina (Bionutrec, 2014). La concentración inicial óptima o tamaño del inóculo, juega un importante papel en el desarrollo en el interior del cultivo; concentraciones demasiado bajas pueden perderse por fotooxidación u otras causas, mientras que si son demasiado altas se producen pérdidas debido a la respiración o a una ineficiente utilización de la energía lumínica, debido al propio ensombrecimiento (Abalde *et al.*, 1995).

El inóculo inicial debe estar constituido únicamente con la especie a cultivo de la espirulina (no contaminado) en buen estado, la calidad del inóculo debe comprobarse en cada paso de las distintas escalas de cultivo (Abalde *et al.*, 1995).

Capítulo VIII: Principales fuentes de contaminación en el cultivo artesanal de espirulina.

Uno de los puntos más importantes a considerar en el cultivo artesanal de la espirulina son los factores contaminantes que se pueden presentar en cualquier etapa de nuestro cultivo. Existen una variedad de microorganismos capaces de vivir en condiciones extremas de salinidad y pH como la espirulina (Bionutrec, 2014). En los cultivos en el exterior son inevitables cierto tipo de contaminaciones dadas las condiciones no asépticas, ya que ni el medio ni el ambiente están estériles, en la práctica, es necesario monitorizar y controlar tales contaminantes, con el fin de obtener una biomasa algal sin impurezas perjudiciales a la salud y para mantener los contaminantes dentro de unos límites tolerables (Abalde *et al.*, 1995).

Algas indeseables: Este es uno de los mayores problemas de los cultivos en el exterior, este tipo de contaminación reduce el rendimiento del cultivo y en casos extremos, el alga contaminante puede desplazar el cultivo original (Abalde *et al.*, 1995). Un cultivo donde la salinidad o la concentración de la espirulina son muy bajas, puede ser invadido por un alga verde monocelular (comestible) llamada *Chlorella* spp. Felizmente la *Chlorella* cae al fondo del estanque del cultivo de espirulina cuando la agitación es interrumpida, quedando en la oscuridad donde ella muere al cabo de unos días, lo mismo ocurre con las microalgas denominadas diatomeas (TechnAp, 2005).

Algunas cianobacterias verdeazuladas tóxicas que pueden aparecer en nuestro cultivo si es que no hay un óptimo control de él son las *Anabaena*, *Anabaenopsis arnoldii* y *Microcystis*, por seguridad es recomendable hacer verificar su ausencia con un microscopio por un microbiólogo una vez al año (TechnAp, 2005).

Mohos, levaduras y hongos: La contaminación por mohos, levaduras y hongos en los cultivos se produce con cierta frecuencia; sin embargo, no presentan serios problemas para el comportamiento de las algas ni para el consumidor (Abalde *et al.*, 1995). En el cultivo de espirulina es poca o nula la frecuencia de aparición de estos contaminantes dado a las características del cultivo como alta salinidad, pH y temperatura para el crecimiento de él, a pesar de ello, se recomienda siempre estar atentos a la aparición de cualquier factor contaminante a través del monitoreo microbiológico del cultivo.

Bacterias: Normalmente las bacterias patógenas habituales no pueden sobrevivir en un óptimo medio de cultivo de la espirulina, cuando el pH supera el nivel 9.5 durante la producción, sin embargo, es recomendable hacer controles bacteriológicos al cultivo al menos una vez al año (TechnAp, 2005).

Zooplankton: No se ha encontrado este tipo de contaminación en los cultivos de espirulina, debido probablemente al elevado pH y concentración de sales del medio en estos cultivos, no obstante, se recomienda estar atento siempre a los análisis microbiológicos del cultivo (Abalde *et al.*, 1995; Bionutrec, 2014).

Insectos: En los cultivos de espirulina se ha encontrado la presencia de larvas de moscas *Ephydra* o de mosquitos, rotíferos y amebas (normalmente no tóxicas) (TechnAp, 2005). La utilización de insecticidas puede provocar problemas de contaminación y acumulación y, por tanto, debe evitarse su utilización; para eliminar estos animales físicamente podemos utilizar un colador para larvas o para eliminarlos biológicamente podemos aumentar momentáneamente la salinidad, el pH o la temperatura del cultivo (Abalde *et al.*, 1995; TechnAp, 2005).

Otros contaminantes: Pueden ser pájaros y roedores o fauna nativa de la zona donde se cultiva, estos aparecen principalmente cuando el cultivo está expuesto a las condiciones de la atmósfera (Bionutrec, 2014). Para combatir la presencia de estos contaminantes, el mejor método es contar con óptimas instalaciones y mantener el cultivo en óptimo crecimiento, ya que se ha demostrado que en esas circunstancias los niveles de contaminación son mínimas (Abalde *et al.*, 1995).

Capítulo IX: Requerimientos legales y normativos para la producción empresarial de un cultivo artesanal de espirulina en San Salvador Atenco, México.

Localización e información de San Salvador Atenco: San Salvador Atenco es la cabecera del municipio de Atenco en el Estado de México (García-Villalpando, 2018). El municipio de Atenco con una superficie de 83.80 Km² está ubicado al oriente del Estado de México, su localización geográfica está entre los 19°29'20" y 19°36'34" de latitud norte; 98°53'38" y 99°00'47" de longitud oeste, a una altura de 2,250 metros sobre el nivel del mar, limitando

al norte con Acolman y Tezoyuca, al sur con Nezahualcóyotl y Chimalhuacán, al este con Texcoco y con Chiautla y Chiconcuac, al oeste con Ecatepec y Nezahualcóyotl (Mora-Cervantes, 1997; Sánchez-Gómez, 1999).

El territorio del municipio se encuentra ubicado en el oriente de la cuenca lacustre, que está situado en el Eje Neovolcánico que cruza la República Mexicana, cuenta con una porción de tierra salitrosa al sur y occidente del municipio que originalmente pertenecían a parte del subsuelo del lago de Texcoco (Mora-Cervantes, 1997).

El municipio cuenta con una población de 75,489 habitantes de los cuales 37,052 son hombres y 38,437 mujeres; cuenta con una población económicamente inactiva de 19,503 habitantes y su principal actividad económica es la agricultura (INEGI, 2010).

Históricamente, y hasta el presente, el cultivo y comercialización de la espirulina ha tenido demasiada importancia en la zona lacustre del Valle de México, el auge de la comercialización en la década de los años sesenta con la creación de la empresa Sosa Texcoco S.A. a la cual se le consideró la empresa de mayor importancia de cultivo de esta cianobacteria en el mundo hasta la década de los noventa, generó más de 2 mil empleos que beneficiaron a los habitantes del municipio de Ecatepec y de zonas aledañas como San Salvador Atenco, de igual forma benefició a pequeños productores dada a la gran demanda que exigía el mercado (Gracia-Fadrique, 2017).

Aunque actualmente a la espirulina se le considera un superalimento y cuenta con la recomendación de consumo en dietas para el combate de la malnutrición por diversas instancias de salud tanto nacionales como internacionales, y aunque han existido incentivos y apoyos del parte del gobierno, la producción local enfrenta la problemática de no cubrir la demanda por insuficiencia de producción (Shamosh-Halabe, 2009). Es por eso por lo que a continuación se presenta los principales requerimientos legales y normativos para la comercialización de la espirulina de una empresa de cultivo artesanal.

Requerimientos legales y normativos para la certificación de alimentos y/o suplementos alimenticios de espirulina: Para el óptimo desarrollo de una empresa productora artesanal de espirulina en San Salvador Atenco Estado de México, debe de ser

importante los requerimientos legales para su funcionamiento y comercialización de sus productos. Hay diversas leyes y normas mexicanas que se deben seguir para llevar a cabo la elaboración, envasado y comercialización de la espirulina en el ámbito alimentario o como suplemento alimenticio, que certifiquen la buena calidad nutricional y la inocuidad de los productos.

Para la certificación para la comercialización de un establecimiento productor de alimentos o de suplementos alimenticios de espirulina, ya sea para comercio nacional o internacional, La COFEPRIS es la autoridad competente para el ejercicio de las atribuciones que le corresponden a la Secretaría de Salud en materia de regulación, control y fomento sanitario de productos y servicios, de su importación y exportación, así como de los establecimientos dedicados al proceso de estos (COFEPRIS, 2017). Para cumplir con esta encomienda, la Comisión realiza acciones de control y vigilancia sanitaria de alimentos y bebidas, suplementos alimenticios, materias primas y aditivos que intervengan en su elaboración, su importación y exportación, así como de los establecimientos destinados al proceso de dichos productos (COFEPRIS, 2017).

Las acciones de control sanitario de alimentos para consumo nacional se realizan en coordinación con las Autoridades Sanitarias Estatales bajo un enfoque de riesgos en el marco del Programa de Alimentos (COFEPRIS, 2017).

Para el control sanitario de alimentos, así como para la certificación (en nuestro caso la espirulina); debe contar con aviso de funcionamiento actualizado y cumplir con lo establecido en:

Ley General de Salud: En la Ley General de Salud de los Estados Unidos Mexicanos se le otorga a la Secretaría de Salud del gobierno de México la competencia para certificar los procesos o productos a que se refiere el artículo 194, fracción I de la Ley General de Salud (LGS), o los establecimientos en los que se lleven a cabo dichos procesos, siempre y cuando éstos cumplan con las disposiciones aplicables en el artículo 287 de dicha ley. También pueden certificarse procesos, productos o establecimientos para propósitos distintos de la exportación, como es lo destinado al consumo doméstico o nacional. Lo anterior sin perjuicio de las atribuciones de la Secretaría de Agricultura, Ganadería,

Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), en materia de control de la inocuidad durante la producción primaria.

También en la Ley General de Salud se menciona las denominaciones en el artículo 215, dando a entender como alimento a cualquier sustancia o producto, sólido o semisólido, natural o transformado, que proporcione al organismo elementos para su nutrición; también se entiende como suplementos alimenticios a los productos a base de hierbas, extractos vegetales, alimentos tradicionales, deshidratados o concentrados de frutas, adicionados o no, de vitaminas o minerales, que se puedan presentar en forma farmacéutica y cuya finalidad de uso sea incrementar la ingesta dietética total, complementarla o suplir alguno de sus componentes; y por último. se entiende como etiquetado frontal de advertencia de alimentos y bebidas no alcohólicas al sistema de información simplificada en el área frontal de exhibición del envase, el cual debe advertir de manera veraz, clara, rápida y simple sobre el contenido que exceda los niveles máximos de contenido energético, azúcares añadidos, grasas saturadas, grasas, sodio y los nutrimentos críticos, ingredientes y las demás que determine la Secretaría de Salud del gobierno de México.

También en la ley se le otorga facultades a la Secretaría de Salud en el artículo 216 en el ámbito de la nutrición de ser la encargada de determinar los productos a los que puedan atribuírseles propiedades nutritivas particulares, incluyendo los que se destinen a regímenes especiales de alimentación. En la Norma Mexicana NMX-F-508-1988 se menciona la utilización del producto alimenticio denominado "Espirulina", como una fuente de proteína en alimentos para consumo humano.

Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicios: Tiene como objetivo la regulación, control y fomento sanitario del proceso, importación y exportación, así como de las actividades, servicios y establecimientos, relacionados con los productos alimenticios y que, por su naturaleza y características, sean considerados como alimentos, bebidas, productos de perfumería, belleza o aseo o tabaco, así como las sustancias asociadas con su proceso. Asimismo, son materia del presente Reglamento el envase, envasado e irradiación de los productos antes precisados. Los productos, establecimientos, actividades y servicios

regulados en el presente Reglamento se refieren a los de uso y consumo humano, excepto cuando expresamente se refiera a otros.

Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009: Esta Norma Oficial Mexicana establece los requisitos mínimos de buenas prácticas de higiene que deben observarse en el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y sus materias primas a fin de evitar su contaminación a lo largo de su proceso de producción. Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para las personas físicas o morales que se dedican al proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, destinados a los consumidores en el territorio nacional.

Los establecimientos que se dediquen al proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, deben cumplir con las disposiciones establecidas en el capítulo 5 de la normativa, según corresponda a las actividades que realicen, en nuestro caso una empresa de cultivo artesanal de espirulina. En el capítulo 5 se detallan:

- Instalaciones y áreas:
 - Los establecimientos deben contar con instalaciones que eviten la contaminación de las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
 - Los pisos, paredes y techos del área de producción o elaboración deben ser de fácil limpieza, sin grietas o roturas.
 - Las puertas y ventanas de las áreas de producción o elaboración deben estar provistas de protecciones para evitar la entrada de lluvia, fauna nociva o plagas, excepto puertas y ventanas que se encuentran en el área de atención al cliente.
 - Debe evitarse que las tuberías, conductos, rieles, vigas, cables, etc., pasen por encima de tanques y áreas de producción o elaboración donde el producto sin envasar esté expuesto. En donde existan, deben mantenerse en buenas condiciones de mantenimiento y limpios.
- Equipo y utensilios:
 - Los equipos deben ser instalados en forma tal que el espacio entre ellos mismos, la pared, el techo y piso, permita su limpieza y desinfección.

- El equipo y los utensilios empleados en las áreas en donde se manipulen directamente materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios sin envasar, y que puedan entrar en contacto con ellos, deben ser lisos y lavables, sin roturas.
- Los materiales que puedan entrar en contacto directo con alimentos, bebidas, suplementos alimenticios o sus materias primas, se deben poder lavar y desinfectar adecuadamente.
- En los equipos de refrigeración y congelación se debe evitar la acumulación de agua.
- Los equipos de refrigeración y congelación deben contar con un termómetro o con un dispositivo de registro de temperatura en buenas condiciones de funcionamiento y colocado en un lugar accesible para su monitoreo.
- Servicios:
 - Debe disponerse de agua potable, así como de instalaciones apropiadas para su almacenamiento y distribución.
 - Las cisternas o tinacos para almacenamiento de agua deben estar protegidos contra la contaminación, corrosión y permanecer tapados. Sólo se podrán abrir para su mantenimiento, limpieza o desinfección y verificación siempre y cuando no exista riesgo de contaminar el agua.
 - Las paredes internas de las cisternas o tinacos deben ser lisas. En caso de contar con respiradero, éste debe tener un filtro o trampas o cualquier otro mecanismo que impida la contaminación del agua.
 - El agua no potable que se utilice para la producción de vapor, refrigeración, sistema contra incendios y otros propósitos similares que no estén en contacto directo con la materia prima, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, debe transportarse por tuberías completamente separadas e identificadas, sin que haya ninguna conexión transversal ni sifonado de retroceso con las tuberías que conducen el agua potable.
 - Para evitar plagas provenientes del drenaje, éste debe estar provisto de trampas contra olores, y coladeras o canaletas con rejillas, las cuales deben mantenerse libres de basura, sin estancamientos y en buen estado. Cuando los drenajes no

permitan el uso de estos dispositivos, se deberán establecer otras medidas que cumplan con la misma finalidad.

- Los establecimientos deben disponer de un sistema de evacuación de efluentes o aguas residuales, el cual debe estar libre de reflujos, fugas, residuos, desechos y fauna nociva.
 - Cuando se requiera, los drenajes deben estar provistos de trampas de grasa.
 - Los baños deben contar con separaciones físicas completas, no tener comunicación directa ni ventilación hacia el área de producción o elaboración y contar como mínimo con lo siguiente:
 - Agua potable, retrete, lavabo que podrá ser de accionamiento manual, jabón o detergente, papel higiénico y toallas desechables o secador de aire de accionamiento automático. El agua para el retrete podrá ser no potable.
 - Depósitos para basura con bolsa y tapadera oscilante o accionada por pedal.
 - Rótulos o ilustraciones en donde se promueva la higiene personal, haciendo hincapié en el lavado de manos después del uso de los sanitarios.
 - La ventilación debe evitar el calor y condensación de vapor excesivos, así como la acumulación de humo y polvo.
 - Si se cuenta con instalaciones de aire acondicionado, se debe evitar que las tuberías y techos provoquen goteos sobre las áreas donde las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios estén expuestos.
 - Se debe contar con iluminación que permita la realización de las operaciones de manera higiénica.
 - Los focos y las lámparas que puedan contaminar alimentos, bebidas o suplementos alimenticios sin envasar, en caso de rotura o estallido deben contar con protección o ser de material que impida su astillamiento.
- Almacenamiento:

- Las condiciones de almacenamiento deben ser adecuadas al tipo de materia prima, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios que se manejen. Se debe contar con controles que prevengan la contaminación de los productos.
- El almacenamiento de detergentes y agentes de limpieza o agentes químicos y sustancias tóxicas se debe hacer en un lugar separado y delimitado de cualquier área de manipulación o almacenado de materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Los recipientes, frascos, botes, bolsas de detergentes y agentes de limpieza o agentes químicos y sustancias tóxicas deben estar cerrados e identificados.
- Las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, deben colocarse en mesas, estibas, tarimas, anaqueles, entrepaños, estructura o cualquier superficie limpia que evite su contaminación.
- La colocación de materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios se debe hacer de tal manera que permita la circulación del aire.
- La estiba de productos debe realizarse evitando el rompimiento y exudación de empaques y envolturas.
- Los implementos o utensilios tales como escobas, trapeadores, recogedores, fibras y cualquier otro empleado para la limpieza del establecimiento, deben almacenarse en un lugar específico de tal manera que se evite la contaminación de las materias primas, los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
- Control de operaciones:
 - Los establecimientos pueden instrumentar un Sistema de HACCP, el cual tiene como objetivo identificar los peligros relacionados con la seguridad del consumidor que puedan ocurrir en la cadena alimentaria, estableciendo los procesos de control para garantizar la inocuidad del producto. Cuando la norma oficial mexicana correspondiente al producto que se procesa en el establecimiento lo establezca, su instrumentación será obligatoria.
 - Los equipos de congelación se deben mantener a una temperatura que permita la congelación del producto.
 - Se debe evitar la contaminación cruzada entre la materia prima, producto en elaboración y producto terminado.

- Los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios procesados no deben estar en contacto directo con los no procesados, aun cuando requieran de las mismas condiciones de temperatura o humedad para su conservación.
- El establecimiento periódicamente debe dar salida a productos y materiales inútiles, obsoletos o fuera de especificaciones.
- Control de materias primas:
 - Los establecimientos que preparen o elaboren alimentos, bebidas o suplementos alimenticios deben inspeccionar o clasificar sus materias primas e insumos antes de la producción o elaboración del producto.
 - No utilizar materias primas que ostenten fecha de caducidad vencida.
 - Tener identificadas sus materias primas, excepto aquellas cuya identificación sea evidente.
 - Separar y eliminar del lugar las materias primas que evidentemente no sean aptas, a fin de evitar mal uso, contaminaciones y adulteraciones.
 - Cuando aplique, las materias primas deben mantenerse en envases cerrados para evitar su posible contaminación.
 - No aceptar materia prima cuando el envase no garantice su integridad.
 - No aceptar las materias primas cuando al corroborar sus características alguna de éstas corresponda a la de rechazo (olor putrefacto, coloración anormal etc.).
 - Las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, deben almacenarse de acuerdo con su naturaleza e identificarse de manera tal que se permita aplicar un sistema de PEPS, esto quiere decir un sistema de manejo de inventario, el cual consiste en rotar inicialmente los productos que ingresaron de primero, es decir, siempre rotar el producto que más tiempo lleva en nuestra operación.
- Control del envasado:
 - Los envases y recipientes que entren en contacto directo con la materia prima, alimento, bebida o suplemento alimenticio, se deben almacenar protegidos de polvo, lluvia, fauna nociva y materia extraña.
 - Se debe asegurar que los envases se encuentren limpios, en su caso desinfectados y en buen estado antes de su uso.

- Los materiales de envase primarios deben ser inocuos y proteger al producto de cualquier tipo de contaminación o daño exterior.
- Los materiales de empaque y envases de materias primas no deben utilizarse para fines diferentes a los que fueron destinados originalmente, a menos que se eliminen las etiquetas, las leyendas y se habiliten para el nuevo uso en forma correcta.
- Los recipientes o envases vacíos que contuvieron medicamentos, plaguicidas, agentes de limpieza, agentes de desinfección o cualquier sustancia tóxica, no deben ser reutilizados para alimentos, bebidas o suplementos alimenticios y deben ser dispuestos de manera tal que no sean un riesgo de contaminación a las materias primas, productos y materiales de empaque.
- Control del agua en contacto con los alimentos:
 - El agua que esté en contacto directo con alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, materias primas, superficies en contacto con el mismo, envase primario o aquella para elaborar hielo debe ser potable y cumplir con los límites permisibles de cloro residual libre y de organismos coliformes totales y fecales establecidos en la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, citada en el apartado de referencias, debiendo llevarse un registro diario del contenido de cloro residual libre.
 - En caso de que no se cuente con la documentación que demuestre el cumplimiento del punto anterior, se deberá utilizar una fuente alterna o tomar las medidas necesarias para hacerla potable antes de añadirla a los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios o de transformarla en hielo para enfriar los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
 - El vapor utilizado en superficies que estén en contacto directo con las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, no debe contener ninguna sustancia que pueda representar riesgo a la salud o contaminar al producto.
- Mantenimiento y limpieza:
 - Los equipos y utensilios deben estar en buenas condiciones de funcionamiento.
 - Después del mantenimiento o reparación del equipo se debe inspeccionar con el fin de eliminar residuos de los materiales empleados para dicho objetivo. El equipo debe estar limpio y desinfectado previo a su uso en el área de producción.

- Al lubricar los equipos se debe evitar la contaminación de los productos que se procesan.
- Se deben emplear lubricantes grado alimenticio en equipos o partes que estén en contacto directo con el producto, materias primas, envase primario, producto en proceso o producto terminado sin envasar.
- Las instalaciones (incluidos techo, puertas, paredes y piso), baños, cisternas, tinacos y mobiliario deben mantenerse limpios.
- Las uniones en las superficies de pisos o paredes recubiertas con materiales no continuos en las áreas de producción o elaboración de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios deben permitir su limpieza.
- Los baños deben estar limpios y desinfectados y no deben utilizarse como bodega o para fines distintos para los que están destinados.
- Los agentes de limpieza para los equipos y utensilios deben utilizarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante o de los procedimientos internos que garanticen su efectividad, evitando que entren en contacto directo con materias primas, producto en proceso, producto terminado sin envasar o material de empaque.
- Los agentes de desinfección para los equipos y utensilios deben utilizarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante o de los procedimientos internos que garanticen su efectividad.
- La limpieza y desinfección deben satisfacer las necesidades del proceso y del producto de que se trate.
- El equipo y los utensilios deben limpiarse de acuerdo con las necesidades específicas del proceso y del producto que se trate.
- Control de plagas:
 - El control de plagas es aplicable a todas las áreas del establecimiento incluyendo el transporte de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
 - No se debe permitir la presencia de animales domésticos, ni mascotas dentro de las áreas de producción o elaboración de los productos.
 - Se deben tomar medidas preventivas para reducir las probabilidades de infestación y de esta forma limitar el uso de plaguicidas.

- Debe evitarse que en los patios del establecimiento existan condiciones que puedan ocasionar contaminación del producto y proliferación de plagas, tales como: equipo en desuso, desperdicios y chatarra, maleza o hierbas, encharcamiento por drenaje insuficiente o inadecuado.
- Los drenajes deben tener cubierta apropiada para evitar la entrada de plagas provenientes del alcantarillado o áreas externas.
- En las áreas de proceso no debe encontrarse evidencia de la presencia de plagas o fauna nociva.
- Cada establecimiento debe tener un sistema o un plan para el control de plagas y erradicación de fauna nociva, incluidos los vehículos de acarreo y reparto propios.
- En caso de que alguna plaga invada el establecimiento, deben adoptarse medidas de control para su eliminación por contratación de servicios de control de plagas o auto aplicación, en ambos casos se debe contar con licencia sanitaria.
- Los plaguicidas empleados deben contar con registro emitido por la autoridad competente.
- Los plaguicidas deben mantenerse en un área, contenedor o mueble aislado y con acceso restringido, en recipientes claramente identificados y libres de cualquier fuga, de conformidad con lo que se establece en las disposiciones legales aplicables.
- En caso de contratar los servicios de una empresa, se debe contar con certificado o constancia del servicio proporcionado por la misma. En el caso de auto aplicación, se debe llevar un registro. En ambos casos debe constar el número de licencia sanitaria expedida por la autoridad correspondiente.
- Manejo de residuos:
 - Se deben adoptar medidas para la remoción periódica y el almacenamiento de los residuos. No deberá permitirse la acumulación de residuos, salvo en la medida en que sea inevitable para el funcionamiento de las instalaciones.
 - Los residuos generados durante la producción o elaboración deben retirarse de las áreas de operación cada vez que sea necesario o por lo menos una vez al día.
 - Se debe contar con recipientes identificados y con tapa para los residuos.
- Salud e higiene del personal

- Debe excluirse de cualquier operación en la que pueda contaminar al producto, a cualquier persona que presente signos como: tos frecuente, secreción nasal, diarrea, vómito, fiebre, ictericia o lesiones en áreas corporales que entren en contacto directo con los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Solo podrá reincorporarse a sus actividades hasta que se encuentre sana o estos signos hayan desaparecido.
- El personal debe presentarse aseado al área de trabajo, con ropa y calzado limpios.
- Al iniciar la jornada de trabajo, la ropa de trabajo debe estar limpia e íntegra.
- Al inicio de las labores, al regresar de cada ausencia y en cualquier momento cuando las manos puedan estar sucias o contaminadas, toda persona que opere en las áreas de producción o elaboración, o que esté en contacto directo con materias primas, envase primario, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, debe lavarse las manos, de la siguiente manera:
 - Enjuagarse las manos con agua, aplicar jabón o detergente. En caso de que el jabón o detergente sea líquido debe aplicarse mediante un dosificador y no estar en recipientes destapados;
 - Frotarse vigorosamente la superficie de las manos y entre los dedos. Para el lavado de las uñas se puede utilizar cepillo. Cuando se utilice uniforme con mangas cortas, el lavado será hasta la altura de los codos;
 - Enjuagarse con agua limpia, cuidando que no queden restos de jabón o detergente. Posteriormente puede utilizarse solución desinfectante;
 - Secarse con toallas desechables o dispositivos de secado con aire caliente.
- Si se emplean guantes, éstos deben mantenerse limpios e íntegros. El uso de guantes no exime el lavado de las manos antes de su colocación.
- La ropa y objetos personales deberán guardarse fuera de las áreas de producción o elaboración de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
- No se permite fumar, comer, beber, escupir o mascar en las áreas donde se entra en contacto directo con alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, materias primas y envase primario. Evitar estornudar o toser sobre el producto.
- Transporte:
 - Los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios, deben ser transportados en condiciones que eviten su contaminación.

- Se deben proteger los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios de la contaminación por plagas o de contaminantes físicos, químicos o biológicos durante el transporte.
- Los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios que requieren refrigeración o congelación deben transportarse de tal forma que se mantengan las temperaturas específicas o recomendadas por el fabricante o productor.
- Los vehículos deben estar limpios para evitar la contaminación de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios.
- Capacitación:
 - Todo el personal que opere en las áreas de producción o elaboración debe capacitarse en las buenas prácticas de higiene, por lo menos una vez al año.
 - La capacitación debe incluir:
 - Higiene personal, uso correcto de la indumentaria de trabajo y lavado de las manos;
 - La naturaleza de los productos, en particular su capacidad para el desarrollo de los microorganismos patógenos o de descomposición;
 - La forma en que se procesan los alimentos, bebidas o suplementos alimenticios considerando la probabilidad de contaminación;
 - El grado y tipo de producción o de preparación posterior antes del consumo final;
 - Las condiciones en las que se deban recibir y almacenar las materias primas, alimentos, bebidas o suplementos alimenticios;
 - El tiempo que se prevea que transcurrirá antes del consumo;
 - Repercusión de un producto contaminado en la salud del consumidor, y
 - El conocimiento de la presente NOM, según corresponda.

Norma Mexicana NMX-F-508-1988: Esta Norma Mexicana especifica las características que debe cumplir el producto denominado "espirulina", empleada como fuente de proteína en alimentos para consumo humano; aunque hay que tener en cuenta que esta norma tiene más de 34 años desde su elaboración a la actualidad de esta investigación, se encuentra vigente y sin modificaciones en el Diario Oficial de la Federación, por lo que se hizo una

búsqueda de modificaciones o creaciones de nuevas normas que complementen a esta. La espirulina, objeto de esta norma, debe cumplir con las especificaciones siguientes:

- Sensoriales:
 - Color **Verde oscuro**
 - Sabor Característico
 - Olor Característico
 - Textura Polvo fino- que pasa 100% por una malla M 0.150
- Químicas:

Tabla 8. Especificaciones químicas para la comercialización de espirulina.

ESPECIFICACIONES	MÍNIMO	MÁXIMO
Humedad	-	10 .0%
Proteína	60.0%	-
Cenizas	-	9. 0%
Fibra cruda	-	0.9%
Nitrógeno orgánico total	9.6%	-
Carbohidratos totales	13.0%	16.5%
Lípidos totales	6.0%	-
Calcio	1 g/kg	-
Fósforo	7 g/kg	-

Nota: Estas determinaciones es con base a 1kg.

- Microbiológicas:

Tabla 9. Especificaciones microbiológicas del producto espirulina para su comercialización.

ESPECIFICACIONES	MÁXIMO
Bacterias mesofílicas aerobias	50.000 col/g
Hongos y levaduras	10 col/g
Coliformes no patógenas	Negativo
<i>Salmonella</i>	Negativo
<i>Shigella</i>	Negativo
<i>E. coli</i> entero patógena	Negativo

- Contaminantes químicos:

El producto objeto de esta norma debe estar libre de contaminantes químicos que puedan representar un riesgo para la salud. Los límites máximos para estos contaminantes quedan sujetos a los que establezca la Secretaría de Salud.

- Materia extraña objetable:

El límite máximo de fragmentos de insectos debe ser de 15 en 50 g de muestra del producto terminado, en promedio de 5 muestras, y debe estar exento de pelos y excretas de roedores u otras materias extrañas. En caso de díptero *Ephydra hians* se permite hasta 200 fragmentos en 50 g de muestra del producto terminado, en promedio de 5 muestras.

- Muestreo:

Cuando se requiera el muestreo del producto, este podrá ser establecido de común acuerdo entre productor y comprador, recomendándose el uso de la Norma Mexicana NMX-Z-12/1,2,3-1987.

- Muestreo oficial:

El muestreo para efectos oficiales estará sujeto a la legislación y disposiciones de la Dependencia Oficial correspondiente.

- Marcado y etiquetado:

- Cada envase del producto debe llevar una etiqueta o impresión permanente visible redactado en español con los siguientes datos:
- Denominación del producto.
- Nombre comercial o marca oficial registrada; pudiendo aparecer el símbolo del fabricante.
- El Contenido Neto, de acuerdo con las disposiciones vigentes de la Secretaría de Economía en la NOM-002-SCFI-2011 y de la Secretaría de Salud NOM-051-SCFI/SSA1-2010.
- Texto de las siglas Reg. S.S.A. No. _____ "A", debiendo figurar en el espacio en blanco el número del registro correspondiente.
- Nombre o razón social del titular del registro y domicilio en donde se elabora el producto.
- Número de lote o fecha de la fabricación y fecha de caducidad.
- La leyenda HECHO EN MÉXICO.
- Cuando el producto sea exclusivamente para exportación y el comprador así lo requiera, el texto podrá ser escrito en otro idioma.

- Marcado en el embalaje:

Deben anotarse los datos necesarios de para identificar el producto y todos aquellos que se juzguen convenientes tales como las precauciones que deben, tenerse en el manejo y uso de los embalajes.

- Envases:

El producto objeto de esta norma, se debe envasar en recipientes o en un material resistente e inocuo, que garantice la estabilidad de este, que evite su contaminación, no altere su calidad ni sus especificaciones sensoriales

- Embalaje:

Para el embalaje, se debe usar un material apropiado, que tenga la debida resistencia y que ofrezca la protección adecuada a los envases para impedir su deterioro, facilite su manejo en el almacenamiento y distribución de estos, sin exponer a las que las manipulen.

- Almacenamiento:

El producto debe almacenarse en locales sanitarios para que no se altere la calidad de este, de acuerdo con esta norma.

Discusión.

Un manual de divulgación científica corresponde a una publicación sencilla, de diseño atractivo y manejo intuitivo, con pautas y consejos útiles para mejorar la comunicación entre los científicos y el público general no especializado en el tema a tratar; con un lenguaje claro, sintético y común para el público (Perla & Martínez, 2011). La importancia de la divulgación científica en las comunidades sociales radica en que el conocimiento generado por las comunidades científicas no solo se quede en esa comunidad o en instituciones académicas, si no que el conocimiento creado y/o adquirido se integre a las sociedades a través de la divulgación del conocimiento y que dicha información les sea útil para conocer sus entornos o generarles un beneficio (Vivas, 2021).

Este manual objeto de elaboración resume a través de la recopilación bibliográfica intensiva a través de publicaciones científicas las características que deben considerarse para el cultivo artesanal de la espirulina (*Arthrospira* spp.) con un lenguaje sencillo e ilustrativo para el entendimiento del público interesado en el tema, con comparaciones de diversos sistemas y métodos que mejor les beneficien para el cultivo de estas especies, con énfasis

en la población del municipio de San Salvador Atenco en el Estado de México, brindándoles información sobre un alimento que se ha encontrado desde tiempos prehispánicos en las zonas lacustres del Valle de México pero por falta de información y de divulgación este alimento considerado como una rica fuente nutritiva es poco su conocimiento. consumo y producción entre sus pobladores.

Conclusiones.

Espero que, con la elaboración del manual y la divulgación del contenido de este a través de diferentes medios, se interese la comunidad de San Salvador Atenco y público en general en el cultivo artesanal de las especies de importancia alimenticia del género *Arthrospira* mencionadas ya en diversos capítulos como una fuente de emprendimiento y una incorporación de estas cianobacterias en la dieta de las comunidades locales generándoles así un beneficio en diversos aspectos como en el económico, en la mejora de la salud y nutrición.

Quiero agradecer a mis asesoras por siempre enriquecer esta investigación con su conocimiento para el beneficio de la divulgación de este superalimento denominado espirulina, a la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco por brindarme las bases y los espacios para recopilar información relacionada al tema, a los habitantes que nos permitieron y nos brindaron espacios para la divulgación del contenido de este manual a través de pláticas y repartición de trípticos y por último, agradecer a mis familiares por todo su apoyo otorgado en lo largo de mi formación académica y personal.

Referencias:

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., & Herrero, C. (1995). Microalgas: cultivo y aplicaciones.
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi journal of biological sciences*, 19(3), 257-275.
- Ación, F. G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C., & Masojídek, J. (2017). Photobioreactors for the production of microalgae. In *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 1-44). Woodhead Publishing.
- Aires, D., Capdevila, N., & Segundo, M. J. (2005). Ácidos grasos esenciales. *Offarm*, 24(4), 96-102.
- Al-Juamilly, K. E., Khalifa, A. J. N., & Yassen, T. A. (2007). Testing of the performance of a fruit and vegetable solar drying system in Iraq. *Desalination*, 209(1-3), 163-170.
- Antenna Technologies (2005) Spirulina: some scientific foundations. <https://antenna.ch/en/activities/nutrition/spirulina-production/>; buscado el 17 de enero 2022.
- Barra-Galárraga, R. F. (2013). Diseño de un fotobioreactor industrial para cultivo de spirulina (*Arthrospira platensis*) Bachelor's thesis.
- Bennamoun, L., Afzal, M. T., & Léonard, A. (2015). Drying of alga as a source of bioenergy feedstock and food supplement—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1203-1212.
- Berry, S., Bolychevtseva, Y. V., Rögner, M., & Karapetyan, N. V. (2003). Photosynthetic and respiratory electron transport in the alkaliphilic cyanobacterium *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. *Photosynthesis research*, 78(1), 67-76.
- Bionutrec, (2014). Cultiva tu propia espirulina, guía práctica para iniciar su cultivo de espirulina a pequeña escala. <https://www.bionutrec.com/wp-content/uploads/2020/07/Manual-Cultivo-Alga-Espirulina.pdf>; buscado el 16 de abril 2022.
- Blanco, R. A. S., & Díaz, M. G. (2017). The unbelievable spirulina. *Medimay*, 24(1), 74-77.
- Borowitzka, M. A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, 70(1-3), 313-321.
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 557-577.

- Bruton, T., Lyons, H., Lerat, Y., Stanley, M., & Rasmussen, M. B. (2009). A review of the potential of marine algae as a source of biofuel in Ireland. *Sustainable Energy Ireland*, 1-88.
- Castenholz, R. W. (1989). Subsection III. Order Oscillatoriales. *Bergey's manual of systematic bacteriology*.
- Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., Loha, V., Tia, S., & Bunnag, B. (2018). Stepwise extraction of high-value chemicals from *Arthrospira* (*Spirulina*) and an economic feasibility study. *Biotechnology Reports*, 20, e00280.
- Challem, J. J. (1981). *Spirulina, a good health guide*. Keats Publishing. Connecticut.
- Chapman, V. J. (1970). *Seaweeds and their uses*. Methuen & Co. Ltd, London, 304 pp.
- Chavarrías, M. (2010). Liofilización para una mejor conservación. *CONSUMER*.
- Chen, C. L., Chang, J. S., & Lee, D. J. (2015). Dewatering and drying methods for microalgae. *Drying technology*, 33(4), 443-454.
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. *Bioresource technology*, 102(1), 71-81.
- Chisti, M. Y. (1989). *Airlift bioreactors* (Vol. 573). London: Elsevier Applied Science.
- CIMA Industries Inc., (2014). Secado por aspersión. <http://www.cimaindustries.com/wp-content/uploads/assets/pdf/es/farmacutica/secador.pdf>; buscado el 22 de marzo 2022.
- COFEPRIS: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017). Certificación de alimentos por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/certificacion-de-alimentos>; buscado el 14 de abril 2022.
- Cohen, Z. (1997). The chemicals of *Spirulina*. *Spirulina platensis*, 175-204.
- Contreras-Flores, C., Peña-Castro, J. M., Flores-Cotera, L. B., & Cañizares-Villanueva, R. O. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28(8), 450-456.
- De Godos, I., Blanco, S., García-Encina, P. A., Becares, E., & Muñoz, R. (2009). Long-term operation of high-rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates. *Bioresource Technology*, 100(19), 4332-4339.
- Des Abbayes, H. (2021). *Botánica. Vegetales inferiores*. Reverté.
- De Souza da Silva, S. P., Perrone, D., & Do Valle, A. F. (2021). Optimization of *Arthrospira maxima* cultivation for biomass and protein production and biomass

- technological treatment to color, flavor, and aroma masking for addition to food products. *Journal of Applied Phycology*, 1-16.
- Diario Oficial de la Federación, (1988). NORMA Mexicana NMX-F-508-1988 Alimentos-Espirulina-Especificaciones.
<https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/DetalleNMX.xhtml?pidn=aFZMT2FPc0QwemMwNm1hR0hXbjU0UT09>; buscado el 14 de abril 2022.
- Diario Oficial de la Federación, (2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009, Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3980/salud/salud.htm>; buscado el 14 de abril 2022.
- Diario Oficial de la Federación, (2012). NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SCFI-2011, Productos preenvasados-Contenido neto-Tolerancias y métodos de verificación. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4828/seeco/seeco.htm>; buscado el 14 de abril 2022.
- Diario Oficial de la Federación, (2014). Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicios.
https://hgm.salud.gob.mx/descargas/pdf/dirgral/marco_juridico/reglamentos/regla_control_sanitario_produc_servicios.pdf; buscado el 14 de abril 2014.
- Diario Oficial de la Federación, (2020). NORMA Oficial Mexicana NOM-051-SCFI/SSA1-2010, Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados-Información comercial y sanitaria. https://www.dof.gob.mx/2020/SEECO/NOM_051.pdf; buscado el 14 de abril 2022.
- Diario Oficial de la Federación, (2022). Ley General De Salud. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGS.pdf>; buscado el 14 de abril 2022.
- Dogaris, I., Welch, M., Meiser, A., Walmsley, L., & Philippidis, G. (2015). A novel horizontal photobioreactor for high-density cultivation of microalgae. *Bioresource Technology*, 198, 316-324.
- Doucha, J., Straka, F., & Lívanský, K. (2005). Utilization of flue gas for cultivation of microalgae *Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*, 17(5), 403-412.
- Enzing, C., Ploeg, M., Barbosa, M., & Sijtsma, L. (2014). Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. *JRC Scientific and policy reports*, 19-37.
- Espinoza, F. (2017). Microalgas en la alimentación ¿suplementos novedosos o reinventados? *Ciencia*, 68(2), 1-4.

- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2008). A review on culture, production and use of *Espirulina* as food for humans and feeds for domestic animals and fish. <https://www.fao.org/3/i0424e/i0424e00.pdf>; buscado el 18 de enero 2022.
- Fasaei, F., Bitter, J. H., Slegers, P. M., & Van Boxtel, A. J. B. (2018). Techno-economic evaluation of microalgae harvesting and dewatering systems. *Algal Research*, 31, 347-362.
- Fernández-Honores, A. M., Alvéitez-Izquierdo, E., & Rodríguez-Rodríguez, E. F. (2019). Taxonomía e importancia de "spirulina" *Arthrospira jenniferi* (Cyanophyceae: Oscillatoriaceae). *Arnaldoa*, 26(3), 1091-1104.
- Fernández-Sevilla, J. M. (2014). Cultivo de microalgas: laboratorio y gran escala. *Microalgal Biotechnology*. Universidad de Almería.
- Fito-Maupoy, P. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat politècnica de Valencia.
- Fogg, G. E., Stewart, W. D. P., Fay, P., & Walsby, A. E. (1973). *The blue-green algae*. Academic Press. London and New York, 459.
- García, J. L., De Vicente, M., & Galan, B. (2018). Presente y futuro del cultivo de las microalgas para su uso como superalimentos. Centro de Investigaciones Biológicas-CSIC e Instituto de Biología Integrativa de Sistemas-CSIC, Madrid. Recuperado el, 29.
- García-Villalpando, A. (2018). La irrupción del mundo vital en grandes obras de infraestructura: estudio de caso, Atenco (Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco. Coordinación de Servicios de Información.).
- González, C. A. (2017). Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción. *Revista ADNAgro*, 18, 1-14.
- Gouveia, L., Graça, S., Sousa, C., Ambrosano, L., Ribeiro, B., Botrel, E. P., & Silva, C. M. (2016). Microalgae biomass production using wastewater: treatment and costs: scale-up considerations. *Algal Research*, 16, 167-176.
- Gracia-Fadrique, J. (2017). *Alga espirulina: De Tenochtitlan a Sosa Texcoco. Biotecnología en movimiento.*
- Greenwell, H. C., Laurens, L. M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., & Flynn, K. J. (2009). Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *JR Soc Interface* 7: 703–726.

- Grima, E. M., Fernández-Sevilla, J. M., & Ación-Fernández, F. G. (2009). Microalgae, mass culture methods. *Encyclopedia of industrial biotechnology: bioprocess, bioseparation, and cell technology*, 1-24.
- Grobbelaar, J. U. (2000). Physiological and technological considerations for optimising mass algal cultures. *Journal of Applied Phycology*, 12(3), 201-206.
- Guiry, MD & Guiry, GM (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <https://www.algaebase.org>; buscado el 29 de diciembre de 2021.
- Gupta, P. L., Lee, S. M., & Choi, H. J. (2015). A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31(9), 1409-1417.
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 1037-1047.
- Henrikson, R. (2010). *Spirulina: World Food. How This Micro Algae Can Transform Your Health and Our Planet*.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Ho, S. H., Chen, C. Y., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems—a review. *Biotechnology advances*, 29(2), 189-198.
- Ho, Y.C., Show, K.Y., Yan, Y.G., & Lee, D.J. (2019). Drying of algae. In: *Drying of Biomass, Biosolids, and Coal: For Efficient Energy Supply and Environmental Benefits*. 97, CRC Press.
- Hosseinizand, H., Lim, C. J., Webb, E., & Sokhansanj, S. (2017). Economic analysis of drying microalgae *Chlorella* in a conveyor belt dryer with recycled heat from a power plant. *Applied Thermal Engineering*, 124, 525-532.
- INDESOL: Instituto Nacional de Desarrollo Social. (2016). *Guía para la producción espirulina, Nutrición Verde*.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*.
- Jeevanandam, J., & Danquah, M. K. (2020). Dewatering and drying of algal cultures. In *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products* (pp. 207-224). Academic Press.

- Kebede, E., & Ahlgren, G. (1996). Optimum growth conditions and light utilization efficiency of *Spirulina platensis* (*Arthrospira fusiformis*) (Cyanophyta) from Lake Chitu, Ethiopia. *Hydrobiologia*, 332(2), 99-109.
- Knuckey, R. M., Brown, M. R., Robert, R., & Frampton, D. M. (2006). Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*, 35(3), 300-313.
- Koru, E. (2012). Earth food *Spirulina* (*Arthrospira*): production and quality standards. *Food additive*, 191-202.
- Larrosa, A. P. Q., Camara, Á. S., Pohndorf, R. S., da Rocha, S. F., & Pinto, L. A. D. A. (2018). Physicochemical, biochemical, and thermal properties of *Arthrospira* (*Spirulina*) biomass dried in spouted bed at different conditions. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1019-1029.
- Martelli, F., Cirlini, M., Lazzi, C., Neviani, E., & Bernini, V. (2021). Solid-state fermentation of *Arthrospira platensis* to implement new food products: evaluation of stabilization treatments and bacterial growth on the volatile fraction. *Foods*, 10(1), 67.
- Martínez, L. (2008). Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas. Universidad de León, España.
- Matter, I. A., Bui, V. K. H., Jung, M., Seo, J. Y., Kim, Y. E., Lee, Y. C., & Oh, Y. K. (2019). Flocculation harvesting techniques for microalgae: a review. *Applied Sciences*, 9(15), 3069.
- Maza, L. R., Guevara, J. M., Gómez, B., Vega, B. A., Cortez, R., & Licet, B. (2017). Producción de pigmentos procedentes de *Arthrospira maxima* cultivada en fotobiorreactores. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 108-114.
- Mendoza H, De la Jara, A & Portillo, E. (2011). Planta piloto de cultivo de microalgas: Desarrollo potencial de nuevas actividades económicas asociadas a la biotecnología en Canarias, Instituto Tecnológico de Canarias, Santa Cruz de Tenerife. 60 pp.
- Moorhead, K., Capelli, B., & Cysewski, G. R. (2011). *Spirulina: Nature's superfood*. Cyanotech Corporation.
- Mora-Cervantes, E. (1997). Trabajo Inédito, Geografía de San Salvador Atenco, Plan de Desarrollo Municipal (1997-2000) del H. Ayuntamiento de San Salvador Atenco. México.
- Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water research*, 40(15), 2799-2815.
- Nicolò M.S., Guglielmino S.P.P., Solinas V., & Salis A. (2017). Biodiesel from Microalgae. In: Lee S. (eds) *Consequences of Microbial Interactions with*

- Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Production of Fuels and Chemicals. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Cham.
- Norton, B., & Probert, S. D. (1984). Solar-energy stimulated, open-looped thermosyphonic air heaters. *Applied energy*, 17(3), 217-234.
- Olaizola, M. (2003). Commercial development of microalgal biotechnology: from the test tube to the marketplace. *Biomolecular engineering*, 20(4-6), 459-466.
- Olenina, L., Patel, I. P., & Portal, A. P. (2014). Health Information GLA (siglas en inglés para Acido Gama-Linolénico).
- ONU: Organización de las Naciones Unidas. (2005). La utilización de microalgas alimenticias contra la malnutrición aguda en las emergencias humanitarias y para el desarrollo sostenible. Naciones Unidas, Treaty Series, vol. 2151, No. 37542.
- Palabiyik, I., Durmaz, Y., Öner, B., Toker, O. S., Coksari, G., Konar, N., & Tamtürk, F. (2018). Using spray-dried microalgae as a natural coloring agent in chewing gum: effects on color, sensory, and textural properties. *Journal of applied phycology*, 30(2), 1031-1039.
- Palomino, A., Estrada, C., & López, J. (2010). Microalgas: potencial para la producción de biodiesel. In *Memoria in extenso IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energética* (pp. 149-157). João Pessoa: EMBRAPA.
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011a). Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high-rate algal pond. *Water research*, 45(20), 6637-6649.
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011b). Wastewater treatment high-rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource technology*, 102(1), 35-42.
- Pedraza, G. (1989). Cultivo de *Spirulina maxima* para suplementación proteica. *Livestock Research for Rural Development*, 1(1), 2.
- Peralta-Ruiz, Y. Y., Cárdenas, Y. P., Romero, H. D. C., & Kafarov, V. (2012). Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. *Prospectiva*, 10(1), 132-144.
- Perla P., & Martínez L. (2011). Manual 'on-line' de Comunicación para Investigadores. Universidad de La Rioja, Unidad de Cultura Científica.
- Phang, S. M., Miah, M. S., Yeoh, B. G., & Hashim, M. A. (2000). *Spirulina* cultivation in digested sago starch factory wastewater. *Journal of Applied Phycology*, 12(3), 395-400.

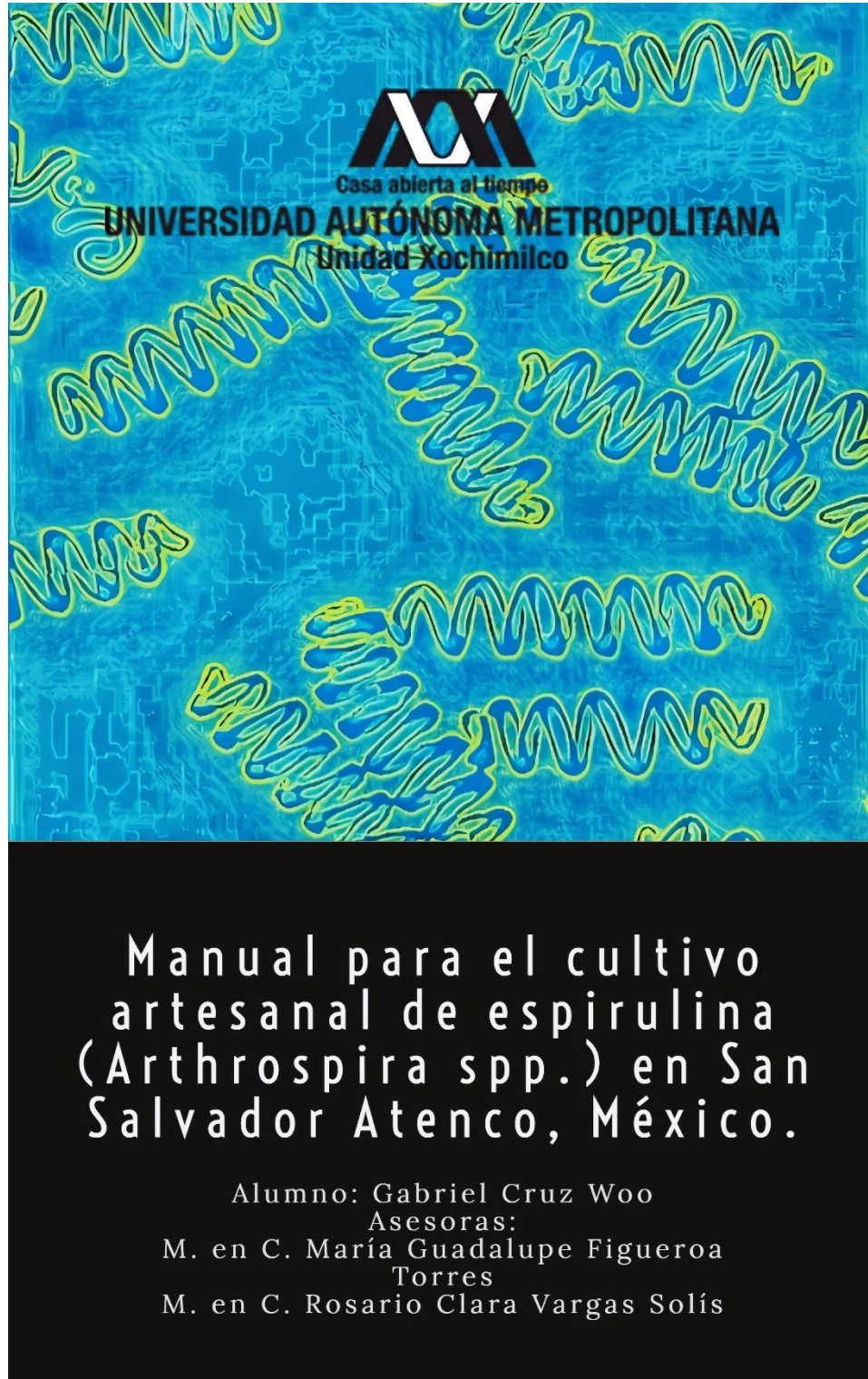
- Piedrahita-Hernández, J. A., & Urbano-Montes, S. (2012). Diseño del sistema de alimentación y control de tempera en un fotobiorreactor para la producción de biomasa y ácidos grasos a partir del cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*.
- Posten, C. (2009). Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. *Engineering in Life Sciences*, 9(3), 165-177.
- Pulzl, O., Gerbsch, N., & Buchholz, R. (1995). Light energy supply in plate-type and light diffusing optical fiber bioreactors. *Journal of Applied Phycology*, 7(2), 145-149.
- Prada-Díaz, Á. D. (2014). Estudio experimental de la aglomeración de partículas en un lecho fluidizado (Master's thesis).
- Priego-Peña, I. (2018). Estudio sobre la cinética de secado de microalgas. Bachelor's thesis.
- QuimiNet (2009). Tema: ¿Qué es el secado mediante tambores o rodillos? <https://www.quiminet.com/articulos/que-es-el-secado-mediante-tambores-o-rodillos-35240.htm>; buscado el 11 de abril 2022.
- Ramírez-Moreno, L., & Olvera-Ramírez, R. (2006). Uso tradicional y actual de *Spirulina* sp. (*Arthrospira* sp.). *Interciencia*, 31(9), 657-663.
- Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied energy*, 88(10), 3411-3424.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell Science Ltd. 178-210, 264, 267.
- Rodríguez-Robles, C. A. (2017). Revisión: Producción de Biodiesel a partir de algas.
- Richmond, A., Lichtenberg, E., Stahl, B., & Vonshak, A. (1990). Quantitative assessment of the major limitations on productivity of *Spirulina platensis* in open raceways. *Journal of Applied Phycology*, 2(3), 195-206.
- Rodríguez-Cuesta, A. R., & Triana-Serrano, F. C. (2006). Evaluación del pH en el cultivo de *Spirulina* spp. (*Arthrospira*) bajo condiciones de laboratorio. Pontificia Universidad Javeriana Facultad De Ciencias. Bogotá, D.C.
- Rubio, F. C., Fernández, F. A., Pérez, J. S., Camacho, F. G., & Grima, E. M. (1999). Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnology and bioengineering*, 62(1), 71-86.
- Ruiz-Reyes, J. M. (2017). Estudio de fotobiorreactor de microalga: sistema de monitoreo y simulación de estrategias de control.

- Sánchez, M., Bernal-Castillo, J., Rozo, C., & Rodríguez, I. (2003). *Spirulina* (Arthrospira): an edible microorganism: a review. *Universitas Scientiarum*, 8(1), 7-24.
- Sánchez-Fuentes Santos, Á. (2016). Modelización y simulación numérica del secado solar de microalgas (Master's thesis).
- Sánchez-Gómez M. A. (1999). Monografía Municipal de San Salvador Atenco. México.
- Sanz-Martínez, V. F. (2019). Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Sasson, A. (1997). Cultivation of *Spirulina*. And Microalgae biotechnology: recent developments and prospects for developing countries. 2nd Asia-Pacific Marine Biotechnol. Conf. / 3rd Asia-Pacific Conf. Algal Biotechnol. Phuket, Tailandia. pp 11-31.
- Schlesinger, A., Eisenstadt, D., Bar-Gil, A., Carmely, H., Einbinder, S., & Gressel, J. (2012). Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production. *Biotechnology advances*, 30(5), 1023-1030.
- Shamosh-Halabe, S. (2009). Historia, nutrición, salud y ecología para generar estrategias de comunicación sobre la espirulina (*A. maxima*) (Master's thesis, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).
- Simioni, T., Quadri, M. B., & Derner, R. B. (2019). Drying of *Scenedesmus obliquus*: Experimental and modeling study. *Algal Research*, 39, 101428.
- Tarazona-Díaz, M. P. (2018). La espirulina una oportunidad como alimento funcional.
- TechnAp, (2005). Cultivo Artesanal De Espirulina (Resumen de la versión francesa). TechnAp: Solidarité Internationale Nutrition & Spiruline.
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, 99(10), 4021-4028.
- Vandamme, D., Foubert, I., & Muylaert, K. (2013). Flocculation as a low-cost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. *Trends in biotechnology*, 31(4), 233-239.
- Vanegas, J., & Hernández, L. H. (2018). Potencial biotecnológico de las microalgas zonas áridas.
- Vásquez, S. V., & Brenes, A. U. (2014). Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella* sp. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 30(1).
- Vivas, J. R. (2021). Manual de comunicación y divulgación científica. Editorial Berenice.

- Vonshak, A., & Tomaselli, L. (2000). *Arthrospira (Spirulina)*: systematics and ecophysiology. In *The ecology of cyanobacteria* (pp. 505-522). Springer, Dordrecht.
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, 30(4), 904-912.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Applied microbiology and biotechnology*, 79(5), 707-718.
- Wong, K., & Cheung, P. C. (2001). Influence of drying treatment on three *Sargassum* species. *Journal of Applied Phycology*, 13(1), 43-50.
- Xarxa espirulina. (2016). Manual práctico de cultivo de espirulina en casa. Red internacional de cultivadores de espirulina por la soberanía alimentaria. <http://www.xarxaespirulina.cat/wp-content/uploads/2010/07/manual-cultivo-espirulina-bq.pdf>; buscado el 18 de enero 2022.
- Xianfeng Drying Equipment Company. (2022). Secador de tambor rotativo: Funcionamiento. <http://www.czxf.cn/es/1-2-rotary-drum-dryer.html>; buscado el 11 de abril 2022.
- Xu, L., Weathers, P. J., Xiong, X. R., & Liu, C. Z. (2009). Microalgal bioreactors: challenges and opportunities. *Engineering in Life Sciences*, 9(3), 178-189.

Anexos:

Anexo 1. Caratula del “Manual para el cultivo artesanal de espirulina (*Arthrospira* spp.) en San Salvador Atenco, México”. El manual se puede encontrar online en el siguiente link: <https://mega.nz/file/EGtkmL7K#p95VkdKbPJ0L-ztTvkwswhtMJNezxINinGgBUui6vkk>.



Anexo 2. Documentos que avalan la exposición del contenido del manual a público interesado en el cultivo artesanal de espirulina el día 20 de mayo del 2022.



A las Comunidades de Xochimilco, San Gregorio Atlapulco y público en general se les invita a las



Pláticas sobre la calidad del agua y cultivo del alga espirulina de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco

síntesis de las investigaciones de los alumnos de la Maestría en Ecología Aplicada y de la Licenciatura en Biología, de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Xochimilco



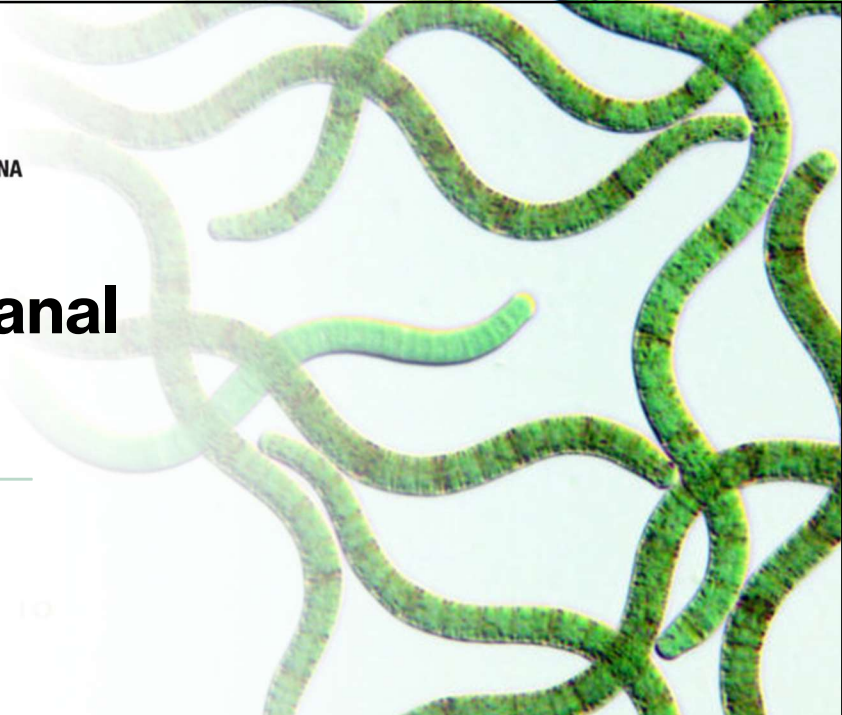
1. El papel de las microalgas en la depuración del agua de residuo de los canales de Xochimilco. Saúl Almanza Encarnación, Maestría en Ecología Aplicada, UAM Xochimilco
2. Tasas de nitrificación y desnitrificación como indicadores de los procesos de eutrofización y producción de óxidos nitrosos dentro del polígono Puente de Urrutia en Xochimilco. Alejandro Polo Hernández, Maestría en Ecología Aplicada, UAM Xochimilco
3. Cultivo artesanal de espirulina. Gabriel Cruz Woo, Licenciatura en Biología, UAM Xochimilco


**Lugar: Salón al sur del Puente de Urrutia, parcela 104 fracción quinta
Ejido de San Gregorio Atlapulco**

Fecha: Viernes 20 de mayo de 2022

Horario: 16 a 18 horas

Anexo 3. Exposición presentada a público interesado en el cultivo artesanal de espirulina el día 20 de mayo del 2022.




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Xochimilco

Cultivo artesanal de espirulina


Gabriel Cruz Woo

1

¿Qué es la espirulina?

La espirulina (género *Arthrospira* spp.) corresponde a un conjunto de especies de cianobacterias fotosintéticas verdeazuladas, con un tamaño generalmente de 100 a 200 μm , que habitan principalmente en lagos alcalinos y que debido a sus altos contenidos nutricionales se cultiva en ambientes acuáticos controlados, para garantizar su calidad e inocuidad para el consumo humano.

El género *Arthrospira* incluye actualmente 44 especies de las cuales, tres especies son las más cultivadas para el consumo humano: *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*.



Espirulina (*Arthrospira* spp.).

2

Ecología de la espirulina:



Vista aérea del Lago de Texcoco.

- La mayoría de las especies del género *Arthrospira* se han encontrado en cuerpos de agua alcalinos (>30 g/l), con un pH alto (8.5–11) y a temperatura promedio de 25 a 35°C, con alto nivel de radiación solar, principalmente en regiones tropicales o semitropicales, donde crecen de forma masiva y donde es difícil o imposible para otros microorganismos desarrollarse. Sin embargo, algunas especies se han encontrado presentes en cuerpos de agua dulce como ríos, manantiales y estanques con factores fisicoquímicos adecuados para su crecimiento y desarrollo, tales como niveles de pH altos, disponibilidad nutrientes, etc.

3

La espirulina en México.

- En México, el consumo de la espirulina se remonta a tiempos prehispánicos de acuerdo con cronistas españoles del siglo XVI, donde se relata que los indígenas que vivían en Tenochtitlan, capital del imperio Azteca, colectaban un alimento novedoso del lago de Texcoco y elaboraban una especie de pastel o tortilla a la cual llamaban "Tcuitlatl" que significa en náhuatl "comida de barro".
- En la década de los sesenta del siglo XX, el renacimiento de las granjas de producción de espirulina en México se produjo en el lago de Texcoco por la empresa Sosa Texcoco S.A., la empresa instaló una planta de procesamiento en las orillas del Caracol del lago de Texcoco con una producción cercana a las 500 toneladas de espirulina seca al año, convirtiéndose así en la más importante empresa en lo que se refiere a la producción de estas cianobacterias a nivel mundial hasta su cierre en la década de los noventa.

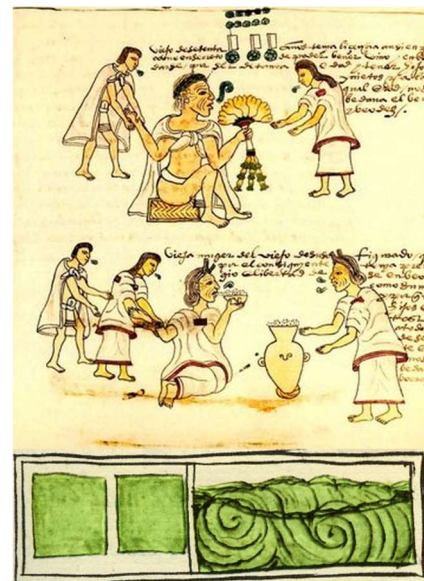


Ilustración del alimento Tcuitlatl.

4

¿Porqué es importante la espirulina?

- La importancia de la espirulina recae en sus altos valores micro y macro nutritivos, siendo catalogado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 1996 como un superalimento para combatir el problema de desnutrición en las poblaciones de más de 70 países; así mismo la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2005 recomiendan la utilización de la espirulina para corregir estados nutricionales; convirtiéndose en uno de los pocos productos alimentarios en ser reconocido completamente y propuesto como una posible solución definitiva a los problemas alimentarios mundiales y para el desarrollo sostenible del planeta.
- A la espirulina se le atribuyen muchas propiedades, por ejemplo: propiedades anticancerígenas, refuerza el sistema inmunitario, actúa como antioxidante, controla la diabetes, el colesterol, la anemia, favorece la eliminación de los metales pesados y la radioactividad en cuerpo, ayuda a la recuperación del esfuerzo físico, combate la fatiga, el estrés, entre otros.

5

Propiedades nutricionales de la espirulina:

Proteínas 50-70%

Leucina
Valina
Isoleucina
Lisina
Fenilalanina
Metionina
Triptófano
Tirosina
Ácido glutámico
Ácido aspártico
Cistina

Vitaminas

Provitamina A
Tiamina B1
Riboflavina B2
Niacina B3
Vitamina B6
Cobalamina B12
Vitamina E
Vitamina K
Ácido fólico
Ácido pantoténico
Biotina

Ácidos grasos 3-6.5%

Ácido mirístico
Ácido palmítico
Ácido palmitoleico
Ácido γ -linoleico (GLA)
Ácido linoleico
Ácido oleico

6

Minerales 7%	Carbohidratos 15-20%	Pigmentos 6%
Potasio	Glicerol	Clorofila a
Sodio	Glucosa	Carotenoides
Fósforo	Ramnosa	β -caroteno
Calcio	Fucosa	Equinenona
Magnesio	Ribosa	b-criptoxantina
Hierro	Xilosa	3'-hidroxiequinenona
Manganeso	Manosa	Zeaxantina
Zinc	Galactosa	Diatoxantina
Cobre	D-Glucosamina	Cantaxantina
Cromo		Mixoxantofila
		Oscillaxantina
		Ficocianina

7

¿En qué consiste un cultivo artesanal de espirulina?

- Se le denomina cultivo artesanal de espirulina, al cultivo de especies de *Arthrospira* como pueden ser *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis* de una manera de producción no industrial que involucran técnicas y maquinarias simples y económicas al alcance de cualquier algocultor, permitiéndoles comercializar y difundir el cultivo en zonas locales.
- Las empresas dedicadas a la producción artesanal de espirulina son generalmente microempresas que se caracterizan por una plantilla laboral no mayor de 10 trabajadores, con sistemas de cultivo abiertos en lagos o estanques naturales o invernaderos con sistemas de cultivo estilo raceways, con cosecha mediante filtración, tamizado o prensado y secado de biomasa mediante la radiación solar directa o indirecta.

8

Parámetros fisicoquímicos para el óptimo cultivo artesanal de la espirulina:

Calidad del agua.

- Debe de utilizarse agua potable y sin cloro. Se debe considerar estrategias para el control por contaminación bacteriológica y de otros patógenos si es que se emplea agua de un medio acuífero natural, mientras para la declaración del agua procedente del grifo se pueden utilizar filtros de carbón activado o dejarla expuesta por 24 horas a la intemperie para que el cloro se evapore.



pH del agua.

- El nivel ideal del pH para el buen crecimiento de la espirulina es de 10.5, aunque puede sobrevivir en un pH aún mayor de 11.5, mientras con pH menores el crecimiento poblacional es retardado y con baja densidad.



El pHmetro es el instrumento que se emplea para medir los niveles de pH en el cultivo.

9

Nivel de agua.

- El nivel del agua en el estanque debe mantenerse alrededor del nivel deseado, dado que es un factor que está relacionado con la disponibilidad de la luz para los filamentos algales, cosa que afectará la utilización del CO_2 . La evaporación puede compensarse agregando agua y el exceso de agua por diversos factores como por la caída de lluvias puede ser modificado vaciando una parte del medio.



Luz.

- Es indispensable para el crecimiento de la espirulina a través de la fotosíntesis, pero la exposición prolongada mayor a 12 horas al día es perjudicial para su crecimiento y desarrollo, siendo preferente la exposición del cultivo a media sombra para el mejoramiento de su calidad (con más sombra más ficocianina), de igual forma la exposición prolongada al sol de la espirulina provoca que sus filamentos sean destruidos por fotólisis; de aquí la necesidad de agitar correctamente el cultivo.



10

Agitación.

- Es necesaria para repartir la iluminación, la temperatura y los nutrientes en el cultivo, para estimular la formación de nuevos filamentos, así como para prevenir que la espirulina se acumule en la superficie y en el fondo del estanque, evitando la fermentación anaeróbica de los depósitos orgánicos. Es muy recomendable la agitación en los momentos de máxima radiación solar, pudiendo funcionar en intervalos de 15 o 30 minutos o de 1 a 3 horas al día, a fin de obtener un mayor rendimiento fotosintético.



Tamaño de inóculo.

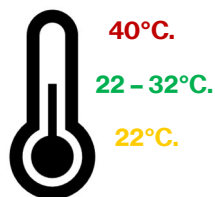
- El inóculo inicial debe estar constituido únicamente con la especie a cultivo (la espirulina) en buen estado, sin contaminación y la calidad del inóculo debe comprobarse en cada paso de las distintas escalas de cultivo.
- Un ejemplo: para un cultivo de espirulina en un estanque de 200 L se puede inocular con un botellón de 20 L.



11

Temperatura.

- Entre los 22 y 32°C la velocidad de crecimiento de la espirulina puede ser exponencial, pudiendo crecer su tamaño en un 25% cada día; la velocidad de crecimiento comienza a disminuir entre los 32 y 40°C y su crecimiento es prácticamente nulo con temperaturas menores a los 20°C.
- Mantener una temperatura más elevada de los 40°C lleva a la destrucción del cultivo.



Salinidad.

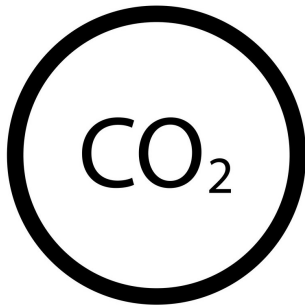
- La salinidad total no debe sobrepasar de 25g/L, siendo la concentración óptima de 10g/L, se trata de los iones: sulfato, cloruro, nitrato y sodio. La medición de la salinidad en el cultivo se lleva a cabo mediante un densímetro.
- Otra forma de salinizar el medio es agregarle bicarbonato.



12

CO₂

- El mayor elemento nutritivo en un cultivo artesanal de espirulina es el carbono, que se puede obtener a través del aire, fijando el dióxido de carbono (CO₂) en el proceso de fotosíntesis, alimentándose y contribuyendo al mismo tiempo a fijar gases de efecto invernadero .



Nutrientes.

- La espirulina se alimenta de nutrientes que se pueden clasificar en macronutrientes (carbono, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, fósforo, sodio, azufre) y micronutrientes (hierro, zinc, cobre, níquel, cobalto, etc.), todos estos elementos son aportados por sus respectivas sales que se disuelven en el agua.



13

Sistema de cultivo en aguas naturales:

- Esta categoría comprende balsas, estanques naturales, lagunas y lagos con una profundidad limitada, donde la espirulina crece sin ningún elemento de control ambiental, expuestos a la contaminación y a los factores atmosféricos tales como la lluvia, el polvo, las aves, los insectos, etc. Para el cultivo en estos sistemas la espirulina es una excelente idea dado que es una especie que puede crecer bajo condiciones en las que otros organismos les resultaría difícil desarrollarse como con una salinidad alta, un pH alto, temperaturas específicas, requerimientos nutritivos específicos, entre otros.



Vista aérea del Caracol del Lago de Texcoco.

14

Sistema de cultivo Raceways:



Sistema de cultivo de espirulina tipo Raceway.

- Son sistemas idóneos para producciones masivas de espirulina a bajo costo, son estanques con forma de pista ovalada que pueden ser contruidos sobre el suelo con cualquier material que sea lo suficientemente resistente, su construcción es relativamente barata y los grandes productores de espirulina, entre ellos Earthrise Farms en California y Cianotech en Hawái los han utilizado por décadas. Una deficiencia es que no pueden ser operados con niveles de agua superiores a los 15 cm, debido a que niveles superiores pueden causar una gran reducción del flujo y de la turbulencia; de igual forma hay que tener en consideración la evaporación del agua por las temperaturas.

15

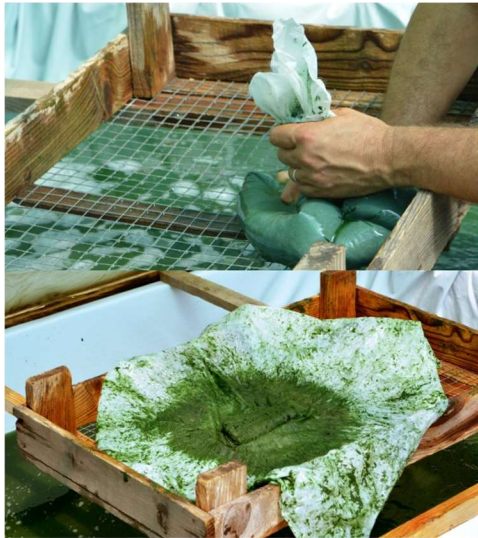
Técnica de cosecha de biomasa, tamizado:

- Es una técnica simple y barata, consiste en hacer pasar el cultivo de espirulina por un tamiz, colador o cernidor con orificios de menor tamaño a lo cultivado (recomendado 32 y 64 μm), de tal manera que, el agua pasa a través de los orificios de este, mientras que la biomasa permanece en él.



Para el tamizado de la espirulina el orificio del tamiz o cernidor debe ser menor a las 70 μm .

16



Para la técnica de prensado se puede colocar la espirulina en un cedazo con orificios y se exprime para que drene el agua.

Técnica de cosecha de biomasa, prensado:

- También llamado compresión, es una operación simple que tiene por finalidad separar la biomasa comprimiéndola, permitiendo al agua fluir y salir mientras que la biomasa queda retenida entre las superficies compresoras.

17

Secado solar de biomasa:



- Es considerado el método de secado más simple y económico; sin embargo, este método depende de un conjunto de variables atmosféricas propias del lugar del secado como la radiación directa, la radiación difusa incidente y la humedad relativa, además que requiere una gran superficie de secado, instalaciones para protección del producto y el tiempo de duración para completar el secado es generalmente mayor.
- Se encuentran dos diferentes tipos de proceso de secado solar, el secado solar abierto (exposición solar directa) y el secado solar cerrado (exposición solar indirecta).

18

Secado solar abierto:

- El secado solar abierto consiste en poner a secar la biomasa en grandes superficies de área donde el sol los cubra, da como resultado un secado lento de la biomasa debido a la disminución de la insolación a lo largo del día, pero puede ser beneficioso en las regiones tropicales, donde la energía solar es abundante.



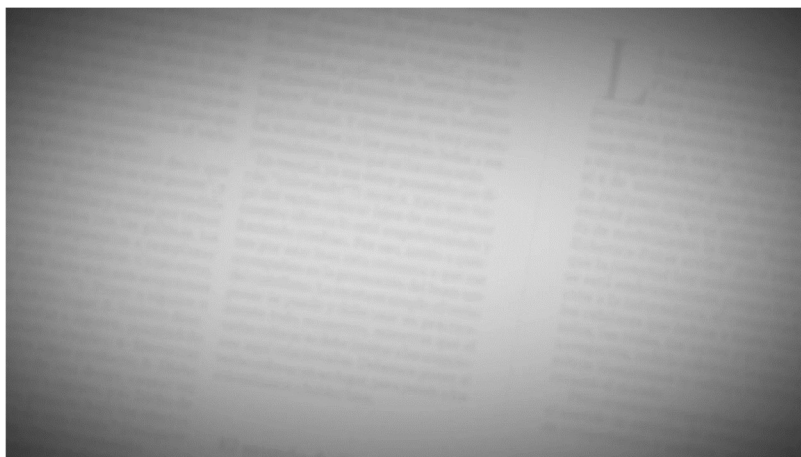
Secado solar cerrado:

- El secado solar cerrado consiste en métodos de deshidratación de la biomasa por exposición solar indirecta, generalmente requieren una temperatura de 35 a 60 °C durante unas 3 a 5 horas de secado para generar un secado final con contenido de humedad por debajo del 10%. La medición del porcentaje de humedad la obtenemos mediante el uso de un humidímetro digital de harinas.



19

Cultivo artesanal de espirulina



20



Requerimientos legales y normativos para la certificación de alimentos y/o suplementos alimenticios de espirulina:

- Actualmente en México no se encuentran algún programa o apoyo gubernamental sea federal o local para el cultivo de espirulina, sin embargo si queremos cultivar la espirulina para el consumo humano tenemos que tener en cuenta:
- Ley General de Salud.
- Reglamento de Control Sanitario de Productos y Servicios.
- Norma Oficial Mexicana NOM-251-SSA1-2009.
- Norma Mexicana NMX-F-508-1988.

21

Norma Mexicana NMX-F-508-1988:

- Esta Norma Mexicana especifica las características que debe cumplir el producto denominado espirulina, empleada como fuente de proteína en alimentos para consumo humano, estas características que debe cumplir son:
 - ✓ Especificaciones sensoriales.
 - ✓ Especificaciones químicas.
 - ✓ Especificaciones microbiológicas.
 - ✓ Contaminantes químicos presentes.
 - ✓ Materia extraña objetable.
 - ✓ Muestreo.
 - ✓ Muestreo oficial.
 - ✓ Marcado y etiquetado.
 - ✓ Marcado en el embalaje.
 - ✓ Envases.
 - ✓ Embalaje.
 - ✓ Almacenamiento.



22

**¡Gracias por su
atención!**

Anexo 4. Tríptico realizado para su difusión sobre el cultivo artesanal de espirulina.

¡Dato curioso!

La espirulina en México.

En México, el consumo de la espirulina se remonta a tiempos prehispánicos de acuerdo con cronistas españoles del siglo XVI, donde se relata que los indígenas que vivían en Tenochtitlan, capital del imperio Azteca, colectaban un alimento novedoso del lago de Texcoco y elaboraban una especie de pastel o tortilla a la cual llamaban "Tecuítlatl" que significa en náhuatl "comida de barro".

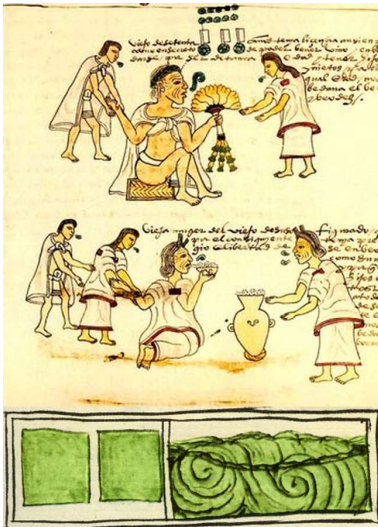


Ilustración en códice novohispano del alimento Tecuítlatl.



Cultivo Artesanal de Espirulina

Por: Gabriel Cruz Woo.

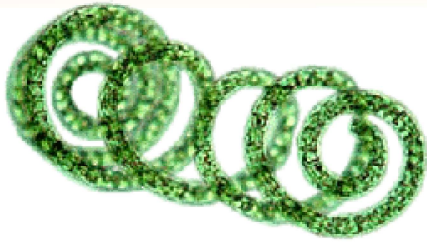
Asesoras:
M. en C. María Guadalupe Figueroa Torres.
M. en C. Rosario Clara Vargas Solís.

- Departamento El Hombre y su Ambiente.
- Licenciatura en Biología, UAM-X.
- Información extraída de la investigación "Manual para el cultivo artesanal de espirulina (*Arthrospira* spp.) en San Salvador Atenco, México".

¿QUÉ ES LA ESPIRULINA?

La espirulina (género *Arthrospira* spp.) corresponde a un conjunto de especies de cianobacterias fotosintéticas verdeazuladas con un tamaño generalmente de 100 a 200 µm, que habitan principalmente en lagos alcalinos y que debido a sus altos contenidos nutricionales se cultiva en ambientes acuáticos controlados, para garantizar su calidad e inocuidad para el consumo humano.

El género *Arthrospira* incluye actualmente 44 especies de las cuales, tres especies son las más cultivadas para el consumo humano: *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*.



Espirulina (*Arthrospira* spp.).

¿PORQUÉ ES IMPORTANTE LA ESPIRULINA?

Su importancia recae en sus altos valores micro y macro nutritivos (contiene los 9 aminoácidos esenciales y un porcentaje de 70% de proteína), siendo catalogado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 1996 como un superalimento y por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2005.

A la espirulina se le atribuyen muchas propiedades, por ejemplo: propiedades anticancerígenas, refuerza el sistema inmunitario, actúa como antioxidante, entre otras.

¿EN QUÉ CONSISTE UN CULTIVO ARTESANAL DE ESPIRULINA?

Se le denomina cultivo artesanal de espirulina, al cultivo de especies de *Arthrospira* como pueden ser *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis* de una manera de producción no industrial que involucran técnicas y maquinarias simples y económicas al alcance de cualquier algocultor, permitiéndoles comercializar y difundir el cultivo en zonas locales.

Las empresas dedicadas a la producción artesanal de espirulina son generalmente microempresas que se caracterizan por una plantilla laboral no mayor de 10 trabajadores, con sistemas de cultivo abiertos en lagos o estanques naturales o invernaderos con sistemas de cultivo estilo raceways, con cosecha mediante filtración, tamizado o prensado y secado de biomasa mediante la radiación solar directa o indirecta.



Proceso de tamizado de un cultivo artesanal de espirulina.

PRINCIPALES PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS PARA EL ÓPTIMO CULTIVO ARTESANAL DE LA ESPIRULINA:

- pH del agua: El pH óptimo para el crecimiento poblacional del cultivo de espirulina es de 10.5, con pH menores el crecimiento poblacional es lento o nulo.
 - Luz: Es indispensable para el crecimiento de la espirulina a través de la fotosíntesis, pero la exposición prolongada mayor a 12 horas al día es perjudicial para su crecimiento y desarrollo, siendo preferente la exposición del cultivo a media sombra para el mejoramiento de su calidad.
 - Temperatura: La temperatura óptima para el cultivo es entre los 22 y 32°C, pudiendo crecer su tamaño en un 25% cada día; la velocidad de crecimiento comienza a disminuir entre los 32 y 40°C y su crecimiento es prácticamente nulo con temperaturas menores a los 20°C.
 - Nutrientes: La espirulina se alimenta de nutrientes que se pueden clasificar en macronutrientes (carbono, nitrógeno, potasio, calcio, magnesio, fósforo, sodio, azufre) y micronutrientes (hierro, zinc, cobre, níquel, cobalto, etc.).
 - Salinidad: La salinidad total no debe sobrepasar de 25g/L, siendo la concentración óptima de 10g/L, se trata de los iones: sulfato, cloruro, nitrato y sodio.
- Calidad del agua: Agua potable y desclorada, libre de bacterias y patógenos dañinos.