

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y AMBIENTALES

CARRERA DE MICROBIOLOGÍA

**Métodos de cultivo de *Arthrospira platensis* en Latinoamérica y su potencial
aplicación en Ecuador**

Monografía previa a la obtención del título de Licenciada en Microbiología

Ambar Nicole Anchaluisa Sandoval

Quito, 2025

Certifico que la Monografía de la carrera de Microbiología de la Srta. Ambar Nicole Anchaluisa Sandoval ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Firma del tutor de la monografía

Diana Astorga García

Quito, 04 de julio de 2025

DEDICATORIA

El final de este proyecto ha sido gracias al apoyo fundamental de diversas personas en mi vida. Primero, expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su cariño y por ser el referente constante en mi educación académica. Agradezco a mis padres y hermano, por su confianza, dedicación y compañía.

Un agradecimiento especial a mis preciadas abuelitas, cuyo cariño y apoyo, manifestado en cada acto, fueron esenciales. Asimismo, rememoro a mi abuelito, cuya inspiración y entusiasmo me impulsaron en instantes significativos. Agradezco a mis tíos y tías por su permanente afecto.

Agradezco profundamente a mi tutora, Diana Astorga García, por su invaluable orientación académica, paciencia y saber. Su orientación especializada fue esencial para la creación de este trabajo y su compromiso ha influido de manera positiva en mi crecimiento.

A mis compañeros de universidad, por el respaldo recíproco y las vivencias compartidas en este periodo de educación. Su amistad desempeñó un papel crucial para enfrentar los retos académicos.

A todo los que han estado conmigo en esta etapa, mi más sincero agradecimiento.

ÍNDICE

Contenido

1. RESUMEN.....	4
2. ABSTRACT	4
3. INTRODUCCIÓN.....	6
4. OBJETIVOS	13
4.1 OBJETIVO GENERAL:	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	13
5. DESARROLLO TEÓRICO	14
5.1 BIOLOGÍA Y FISIOLOGÍA DE <i>SPIRULINA PLATENSIS</i>	14
5.1.1 Taxonomía y características	14
5.1.2 Metabolismo relevante para el cultivo.....	16
5.1.3 Importancia microbiológica y biotecnológica	17
5.2 MÉTODOS DE CULTIVO Y PRODUCCIÓN DE <i>ARTHROSPIRA PLATENSIS</i> EN LATINOAMÉRICA	18
5.2.1 Principales tecnologías empleadas: sistemas abiertos y cerrados.....	18
Cultivos tipo <i>raceway</i>	18
Cultivos en fotobiorreactores	20
5.2.2 Parámetros críticos de cultivo	21
5.2.3 Casos representativos en países de Latinoamérica.....	22
5.3. POTENCIAL DE APLICACIÓN EN ECUADOR: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS.....	28
5.3.1 Condiciones ecológicas y socioeconómicas locales	29
5.3.2 Análisis de viabilidad técnica y sanitaria.....	31
5.3.3 Posibles aplicaciones con base microbiológica.....	35
5.3.4 Riesgos microbiológicos y aspectos regulatorios	37

1. RESUMEN

Este estudio monográfico analiza el potencial de *Arthrospira platensis*, comúnmente conocida como Spirulina, como recurso sustentable para fortalecer la seguridad alimentaria en Ecuador. Aunque el país cuenta con condiciones ambientales favorables, aún no se ha consolidado una producción a gran escala. La investigación evalúa su viabilidad considerando factores ambientales, económicos y de infraestructura. Se destaca su alto valor nutricional, con hasta un 70 % de proteína, vitaminas, aminoácidos esenciales y antioxidantes, que la convierte en un complemento alimenticio accesible y estratégico para combatir la desnutrición en poblaciones vulnerables. Además, se subraya su capacidad para biorremediar aguas residuales y fijar el dióxido de carbono, aportando beneficios ambientales significativos. El trabajo examina los métodos de cultivo, tanto en sistemas abiertos como cerrados, abordando sus ventajas, limitaciones y la importancia del control de parámetros como nutrientes, luz y pH. Se analizan experiencias exitosas en México, Perú y Argentina, donde se han adaptado los sistemas a las condiciones locales. No obstante, en Ecuador persisten desafíos relacionados con la falta de infraestructura, los altos costos tecnológicos y la escasez de personal especializado. Se concluye que superar estos obstáculos mediante inversión y marcos regulatorios adecuados permitirá consolidar una industria biotecnológica sostenible basada en *Arthrospira platensis*.

Palabras clave: bioeconomía circular, estrategias latinoamericanas, *Arthrospira platensis*, métodos de cultivo, seguridad alimentaria, viabilidad.

2. ABSTRACT

This monograph explores the potential of *Arthrospira platensis*, commonly known as Spirulina, as a sustainable resource to enhance food security in Ecuador. Although the country possesses favorable environmental conditions, large-scale production of this microalga has not yet been established. The study assesses its feasibility by examining environmental, economic, and infrastructural factors relevant to its effective implementation. The high nutritional value of *Arthrospira*, containing up to 70 % protein, vitamins, essential amino acids, and antioxidants, positions it as an affordable and sustainable food supplement, particularly valuable in addressing malnutrition in vulnerable populations. Beyond its nutritional benefits, the species also offers environmental advantages, including wastewater bioremediation and carbon dioxide sequestration. The research analyses cultivation systems, comparing open and closed approaches, their respective advantages and limitations, and the need to regulate parameters such as nutrients, light, and pH. Case studies from Mexico, Peru, and Argentina illustrate successful adaptations to local conditions. However, Ecuador still faces significant barriers, including limited infrastructure, high technological costs, and a shortage of trained personnel. The findings suggest that overcoming these challenges through targeted investment, technical training, and supportive regulatory frameworks will be essential to establish a sustainable algae-based biotechnology industry in the country.

Keywords: *Arthrospira platensis*, circular bioeconomy, culture methods, food security, Latin American strategies, viability.

3. INTRODUCCIÓN

Arthrospira platensis, comúnmente conocida como *Spirulina platensis*, es una microalga perteneciente al grupo de las cianobacterias, ampliamente reconocida por sus propiedades nutricionales y aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y biotecnológica. Aunque el nombre científico aceptado actualmente para esta microalga sea *Arthrospira platensis*, en la presente investigación se utilizará el término "Spirulina" de manera generalizada, siguiendo el uso predominante en la literatura científica, técnica y comercial (Belay, 1997; Ciferri, 1983).

En América Latina, países como Chile, Brasil, México, Perú, Costa Rica y Colombia han llevado a cabo investigaciones y proyectos de producción de *Arthrospira*, adaptando los procedimientos de cultivo a las circunstancias climáticas y económicas locales (Arias, 2010; Huarachi et al., 2021). A pesar del potencial ecológico favorable en Ecuador, el país todavía no ha establecido un sistema de producción masivo y eficaz de esta microalga. En este contexto, el presente estudio analiza la factibilidad del cultivo de *Arthrospira* en Ecuador, teniendo en cuenta aspectos ambientales, infraestructurales y económicos que facilitan su implementación efectiva.

Investigaciones como las realizadas por Shiomi y Waisundara (2017) resaltan la elevada presencia de contenido proteico de *Arthrospira*, que puede llegar hasta el 70% de su peso seco, así como su riqueza en aminoácidos esenciales, antioxidantes e inmunomoduladores, lo que le otorga un considerable valor terapéutico. También constituye una fuente importante de vitaminas A, E, B1, B7 y B8. Sin embargo, persiste el debate sobre la biodisponibilidad de la vitamina B12, lo que subraya la necesidad de realizar investigaciones adicionales para confirmar su eficacia como fuente nutricional (Martínez et al., 2024). En el escenario ecuatoriano, *Arthrospira* podría tener un rol fundamental en la

salud pública y alimentaria, al contribuir a la salud pública a través de un recurso nutricional accesible y sustentable.

Además de sus ventajas nutricionales, *Arthrospira* ha evidenciado un potencial significativo en la biorremediación de aguas residuales. Vargas (2022) investigó su habilidad para eliminar sustancias tóxicas en efluentes de la industria ganadera, resaltando su beneficio en la mejora de la calidad del agua en áreas afectadas por contaminación industrial y agrícola en Ecuador. En la industria médica, Muñoz et al. (2021) documentaron la producción de biomasa de *Spirulina* con propiedades anticancerígenas, antioxidantes y antibacterianas. Investigaciones recientes también sugieren que su consumo puede mejorar ciertos biomarcadores en personas con sobrepeso, lo que abre nuevas perspectivas para su uso como suplemento dietético (Martínez et al., 2024).

La capacidad de *Spirulina* para adaptarse a diversas condiciones ambientales y su elevada concentración en proteínas, vitaminas y antioxidantes la convierten en una candidata prometedora para múltiples aplicaciones. Según Ochoa y Moyano (2022), *Spirulina* contiene clorofila y ficocianina, pigmentos que le confieren su característico color azul verdoso y que han demostrado eficacia en el ámbito de la salud humana. Estos compuestos contribuyen a combatir enfermedades cardiovasculares, corregir dislipidemias, actuar como antioxidantes para la regeneración muscular en deportistas y fortalecer el sistema inmunológico. En el ámbito internacional, el consumo de *Arthrospira* ha generado un efecto significativo en la prevención y gestión de varias patologías.

Los métodos de cultivo de *Arthrospira* en América Latina han progresado en función de las condiciones ambientales, económicas y tecnológicas de cada país. Huarachi et al. (2021) analizaron la producción en fotobiorreactores en Perú, resaltando la ventaja del alto nivel de radiación solar para optimizar su desarrollo. Crivellar et al. (2022) investigaron el

cultivo semicontinuo en sistemas cerrados, lo que facilitó el aumento de la concentración de carbohidratos en la biomasa. Por su parte, Xiaopeng et al. (2023) analizaron métodos de extracción y purificación de *Spirulina*, con posibles usos en el sector industrial. En Ecuador, a pesar de tener condiciones ambientales propicias, aún no se ha realizado una exploración sistemática del potencial productivo de *Spirulina*, lo que reafirma la importancia de analizar los métodos de cultivo más apropiados para su cultivo.

Ecuador posee una diversidad geográfica que podría afectar la viabilidad del cultivo de *Arthrospira*. Camacho (2016) estableció que la microalga se desarrolla de forma óptima en un rango de temperatura en un intervalo entre 24 y 35 °C, condiciones presentes en las regiones costera y amazónica del país. Sin embargo, tanto la altitud como la variabilidad de la radiación ultravioleta (UV) en regiones andinas suponen retos adicionales. Sánchez et al. (2020) informaron que una exposición controlada a la radiación UV puede incrementar la producción de biomasa, a pesar de que alertaron sobre la importancia de estrategias de mitigación para prevenir consecuencias negativas. Además, la presencia y calidad de los recursos hídricos en cada región son factores esenciales que se deben analizar para garantizar un cultivo eficiente y sostenible de *Spirulina* en Ecuador.

Existen dos métodos principales para su cultivo: sistemas cerrados y sistemas abiertos. Los sistemas cerrados, pese a necesitar de una inversión inicial más elevada, permiten una supervisión exacta de las condiciones del entorno, resultando en una biomasa de mayor calidad y con una concentración optimizada de compuestos bioactivos y nutrientes. Por otro lado, los sistemas abiertos resultan ser más económicos y accesibles, pueden ser factibles en regiones con condiciones ambientales propicias (Sánchez et al., 2020). La selección del método de cultivo más apropiado para Ecuador dependerá de la accesibilidad de recursos, de los objetivos de producción, ya sea para la exportación o consumo local, y de las condiciones particulares de cada región.

Las investigaciones analizadas indican que Ecuador posee un potencial significativo para adaptar métodos de cultivo exitosos aplicados en otros países de Latinoamérica, aprovechando sus condiciones ambientales. Además, la producción de *Arthrospira* favorecería a la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente, gracias a su habilidad de remediar suelos y cuerpos de agua contaminados (Gómez, 2020). Sin embargo, persisten importantes lagunas de conocimiento que dificultan el establecimiento de un sistema de producción masivo y sostenible. A pesar de los avances en Perú y Brasil, en Ecuador aún no se han desarrollado estudios suficientes que aborden la optimización de la producción a gran escala, la viabilidad económica ni la creación de productos innovadores adaptados al mercado local e internacional. Asimismo, se requiere establecer normativas y estándares de calidad que regulen la producción y comercialización de *Spirulina*. Por ello, esta investigación busca contribuir al cierre de estas brechas mediante un análisis detallado de los sistemas de cultivo más adecuados para el contexto ecuatoriano, considerando aspectos climáticos, tecnológicos y financieros para maximizar la productividad y sostenibilidad de *Arthrospira platensis* en el país.

El alto contenido proteico (60-70%), vitamínico (especialmente de complejo B) y mineral (hierro y calcio) de *Spirulina* la convierte en un recurso con gran potencial para combatir la desnutrición en comunidades vulnerables (Shiomi & Waisundara, 2017). En Ecuador, la desnutrición crónica afecta al 27% de los niños menores de cinco años, siendo las comunidades indígenas de la provincia de Chimborazo algunas de las más afectadas (Ministerio de Salud Pública del Ecuador, 2023). Implementar un método de cultivo eficiente permitiría ofrecer una fuente de alimento sostenible, de bajo costo y alta calidad nutricional para poblaciones con limitado acceso a proteínas de origen animal (Martínez et al., 2024).

El cultivo de *Spirulina* representa una estrategia clave para fortalecer la seguridad alimentaria en comunidades rurales, dado que su producción a pequeña escala permite a las familias generar su propio suministro de alimento de alto valor nutricional. Además de sus beneficios nutricionales, su producción impulsa el desarrollo económico local mediante la creación de pequeñas empresas comunitarias y la generación de empleo en las distintas etapas del proceso, desde el cultivo hasta la comercialización (Tapia, 2010).

La producción de *Spirulina* también podría diversificar la agroindustria ecuatoriana, ofreciendo una alternativa sustentable a los cultivos tradicionales que requieren de grandes cantidades de agua, fertilizantes y pesticidas, y que contribuyen a la degradación del suelo, la deforestación y la contaminación de fuentes hídricas (Gómez, 2020). En Ecuador, el 65 % de la producción agrícola está basada en monocultivos intensivos (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023), generando impactos ambientales negativos. Implementar tecnologías como las utilizadas en Perú por Huarachi et al. (2021), basadas en el uso de fotobiorreactores alimentados con radiación solar, permitiría optimizar la producción de *Spirulina* y reducir la huella ambiental.

El cultivo de *Spirulina* ofrece ventajas medioambientales significativas, destacándose como un eficiente sumidero de carbono. Gracias a su alta eficiencia fotosintética, puede capturar dióxido de carbono en niveles superiores a los de los cultivos terrestres tradicionales (Vargas, 2022). Una hectárea de cultivo de *Spirulina* puede fijar hasta 40 toneladas de dióxido de carbono por año, en comparación con las cinco a 10 toneladas que capturan cultivos tradicionales (Muñoz et al., 2021). Además, su biomasa puede emplearse como fertilizante orgánico, reduciendo la dependencia de insumos químicos y promoviendo la conservación de los recursos naturales (Albarracín, 2022; Vargas, 2022). Su producción requiere menos agua y no compite con cultivos alimentarios, lo que la convierte en una opción estratégica para la mitigación del cambio climático.

La industria de *Arthrospira* tiene el potencial de generar empleo en áreas rurales, abarcando desde la construcción y mantenimiento de infraestructuras de cultivo hasta la recolección, tratamiento y embalaje del producto. Además de generar empleos directos de trabajo para técnicos y agricultores, requiere de servicios auxiliares como logística y transporte, reforzando la economía local de manera integral. También, su venta podría impulsar el desarrollo de pequeñas y medianas empresas (PYMES) dedicadas a la transformación y distribución de productos derivados de *Arthrospira*, incursionando en áreas como la industria cosmética, alimentaria y farmacéutica.

Estudios recientes, tales como los realizados por Crivellar et al. (2022), indican que la producción a gran escala de *Arthrospira* en sistemas semicontinuos pueden incrementar la concentración de carbohidratos, mejorando la calidad de productos cosméticos y alimenticios. Además, los progresos de extracción y purificación mencionados por Xiaopeng et al. (2023) generan nuevas posibilidades para su aplicación en el sector alimenticio y farmacéutico. Todo esto posiciona a *Arthrospira* como una herramienta estratégica para la innovación en diversos sectores de producción, reforzando la importancia de su investigación y uso en el escenario ecuatoriano.

En Ecuador, la industria de *Spirulina* todavía no ha logrado consolidarse, debido a múltiples obstáculos tecnológicos y estructurales. Dentro de los principales desafíos se destacan la falta de infraestructura apropiada para el manejo de la biomasa y la carencia de laboratorios especializados, lo que limita la producción a gran escala y la supervisión de calidad (Sánchez et al., 2020). Asimismo, el elevado costo de tecnologías avanzadas como los fotobiorreactores y la falta de personal capacitado dificultan la optimización del cultivo (Muñoz et al., 2021). La falta de formación y apoyo técnico también restringen la optimización de las ventas y la calidad del producto. Experiencias exitosas en países como México y Brasil

demuestran que la inversión en investigación, desarrollo y formación especializada puede impulsar significativamente la producción y comercialización de *Spirulina*.

En este contexto, las preguntas de investigación que guiaron este estudio fueron:
¿Cuáles son las principales barreras para el desarrollo de una industria sostenible de *Spirulina* en Ecuador y qué estrategias podrían implementarse para superarlas? ¿Qué métodos de cultivo utilizados en países con condiciones climáticas similares han demostrado ser efectivos y podrían adaptarse al contexto ecuatoriano? ¿De qué manera la producción de *Spirulina* podría contribuir a la reducción de la desnutrición en Ecuador? ¿Qué factores influyen en su aceptación como suplemento alimenticio? ¿Y cuál sería el impacto económico y productivo de integrar *Spirulina* en la agroindustria ecuatoriana?

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de *Arthrospira platensis* como recurso sostenible para el fortalecimiento de la seguridad alimentaria en Ecuador, mediante la identificación de métodos de cultivo eficientes y la evaluación de sus impactos socioeconómicos y nutricionales.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

4.2.1. Analizar las condiciones ambientales y geográficas de Ecuador que favorecen el cultivo de *Spirulina*, basándose en experiencias exitosas de otros países de la región, con el fin de determinar su viabilidad en el contexto ecuatoriano.

4.2.2 Explorar métodos de cultivo sostenible de *Spirulina* que optimicen el uso de recursos naturales, como agua, espacio y energía, con el fin de identificar enfoques adecuados para su producción a gran escala en Ecuador.

4.2.3 Evaluar el impacto socioeconómico de la industria de *Spirulina* en Ecuador, considerando su potencial para diversificar la agricultura, generar empleo y mejorar la seguridad alimentaria, especialmente en comunidades vulnerables.

5. DESARROLLO TEÓRICO

5.1 BIOLOGÍA Y FISIOLOGÍA DE *ARTHROSPIRA PLATENSIS*

Comprender la biología y fisiología de *Arthrospira platensis* resulta fundamental para evaluar su potencial como recurso sostenible en el contexto ecuatoriano. Esta cianobacteria ha sido objeto de creciente interés por su notable capacidad adaptativa, su alta eficiencia fotosintética y su excepcional valor nutricional. Su estudio no solo permite identificar las condiciones óptimas para su cultivo, sino también explorar las implicaciones microbiológicas y biotecnológicas que sustentan su aplicación en sistemas alimentarios sostenibles. En este apartado, se analizan los aspectos taxonómicos, fisiológicos y metabólicos más relevantes de *A. platensis*, así como los componentes bioquímicos que le confieren valor agregado en el ámbito de la seguridad alimentaria.

5.1.1 Taxonomía y características

Históricamente, los géneros *Spirulina* y *Arthrospira* fueron agrupados bajo la denominación común de *Spirulina*, debido a su morfología similar, caracterizada por la formación de tricomas helicoidales. No obstante, investigaciones posteriores identificaron diferencias bioquímicas relevantes, como la presencia de ácido linoleico en *Arthrospira*, ausente en *Spirulina*, lo que justificó su separación taxonómica (Bohórques, 2017).

A pesar de estas diferencias, la clasificación conjunta persistió durante décadas debido a su similitud morfológica. En el año de 1989, se estableció la separación oficial entre ambos géneros, con la publicación del Manual de Bacteriología Sistemática de Bergey. De acuerdo con Bohórquez (2017), esta definición demanda un entendimiento detallado de los criterios taxonómicos utilizados en la caracterización de las cianobacterias filamentosas.

Actualmente, la clasificación taxonómica de *Arthrospira* se detalla como sigue:

- Dominio: Bacteria
- Filo: Cyanobacteria
- Clase: Cyanophyceae
- Subclase: Oscillatoriophycidae
- Orden: Oscillatoriales
- Familia: Microcoleaceae
- Género: *Arthrospira*

Esta clasificación ubica a *Arthrospira* dentro de las cianobacterias, un conjunto de organismos fotosintéticos procariotas que juegan un rol fundamental en la evolución de la vida terrestre. Se calcula que estos microorganismos han estado presentes en el planeta desde hace más de 3 600 millones de años, lo que demuestra una destacada habilidad para adaptarse (Bohórques, 2017).

La asignación de *Spirulina* al orden Oscillatoriales y en lugar de al orden Chroococcales, como originalmente, se debe a descubrimientos filogenéticos y moleculares. Este resalta la necesidad de integrar datos morfológicos, bioquímicos y genómicos en el estudio de la evolución microbiana. Respecto a su biología reproductiva, las especies de *Arthrospira* se propagan principalmente mediante fisión binaria, un mecanismo asexual que facilita una rápida expansión bajo condiciones adecuadas. Su flexibilidad morfológica y capacidad de adaptación a ambientes variables indican la presencia de respuestas celulares complejas ante estímulos ambientales (Bohórques, 2017).

5.1.2 Metabolismo relevante para el cultivo

El metabolismo de *Arthrospira platensis* se encuentra profundamente influenciado por elementos fisicoquímicos y ambientales. Como organismo fotoautótrofo, depende de la luz como fuente primaria de energía y del dióxido de carbono como fuente de carbono. Su fotosíntesis se lleva a cabo a través de fotosistemas similares a los de las plantas superiores, generando oxígeno como subproducto. Las condiciones óptimas de cultivo incluyen temperaturas entre 30 y 35 °C, pH alcalino entre 8.5 y 10.5, y una alta disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo, hierro y carbono inorgánico, particularmente en forma de bicarbonato (Abomohra et al., 2016; Vonshak, 1997).

El cultivo de *A. platensis* requiere una formulación precisa del medio de cultivo, como Zarrouk o BG11 (Zarrouk, 1966), que garantice el suministro balanceado de macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, azufre y calcio) esenciales para la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos, lípidos y pigmentos como la ficocianina. Asimismo, micronutrientes como hierro, cobre, zinc, boro y molibdeno son indispensables para la activación de rutas enzimáticas y procesos metabólicos clave (Freire et al., 2024).

El proceso fotosintético, mediante el que *A. platensis* transforma la luz y el dióxido de carbono en biomasa, está influenciado por la intensidad y calidad de la luz, así como la disponibilidad continua de dióxido de carbono (Tian et al., 2018). La optimización de estos factores en sistemas de cultivo a gran escala constituye un campo de estudio activo, orientado a mejorar la eficiencia fotosintética y la productividad. Asimismo, se investiga la capacidad de esta cianobacteria para adaptarse a fuentes de nutrientes no convencionales, con miras a desarrollar sistemas de cultivo sostenibles mediante la circulación de nutrientes. La correcta

agitación del cultivo y la prevención de la contaminación microbiana son factores críticos para asegurar la estabilidad del sistema.

5.1.3 Importancia microbiológica y biotecnológica

Spirulina, y en particular *Arthrospira platensis*, presenta una composición bioquímica excepcional que le confiere un alto valor nutricional y biotecnológico. Su contenido proteico oscila entre 60 y 70 % de su peso seco, con un perfil completo de aminoácidos esenciales, lo que la posiciona como una fuente de proteína de alta calidad (Rivera & Micaela, 2022).

Además, contiene entre 15 y 21 % de carbohidratos, principalmente en forma de glucosa y sacarosa, que actúan como fuentes energéticas de rápida asimilación. Su contenido de ácidos nucleicos comprende proporciones de ARN entre 2.2 y 3.5 % y de ADN entre 0.6 y 1 % del peso seco (Solís, 2022).

La fracción lipídica incluye ácidos grasos esenciales en concentraciones del 1.5 al 2.0 %, fundamentales para diversas funciones fisiológicas. Asimismo, presenta un amplio espectro vitamínico, que incluye vitaminas del complejo B (B1, B2, B3, B9 y B12), así como vitaminas C, D y E. La presencia de minerales como hierro y potasio, complementa su perfil nutricional, favoreciendo el metabolismo energético y a la función inmunológica (Solís, 2022).

Entre sus compuestos bioactivos más importantes destacan la ficocianina (~14 %), pigmento azul con propiedades antioxidantes e inmunomoduladoras; la clorofila, de efecto depurativo y antioxidante; y los carotenoides (≈ 47 %), en especial el betacaroteno, precursor de la vitamina A. Estas características hacen de *Spirulina*

una candidata ideal para aplicaciones funcionales en la nutrición humana, la industria farmacéutica y la biotecnología alimentaria (Solís, 2022).

5.2 MÉTODOS DE CULTIVO Y PRODUCCIÓN DE *ARTHROSPIRA PLATENSIS* EN LATINOAMÉRICA

Con base en su biología y fisiología, el cultivo de *Arthrospira platensis* ha sido adaptado en diversos países de Latinoamérica mediante tecnologías que varían según las condiciones locales. Analizar estos métodos permite identificar estrategias eficientes y sostenibles que pueden orientar su aplicación en Ecuador. Este apartado aborda las principales tecnologías de cultivo, los factores críticos para su producción y casos representativos en la región.

5.2.1 Principales tecnologías empleadas: sistemas abiertos y cerrados

Cultivos tipo *raceway*

Los cultivos tipo *raceway* consisten en canales abiertos de forma ovalada u oblonga, con esquinas redondeadas, en los que el medio de cultivo se mantiene en circulación mediante ruedas de paleta (*paddle wheels*) (Figura 1). Este diseño es ampliamente utilizado para el cultivo a gran escala de microalgas, debido a que permite una exposición uniforme a la luz solar y favorece la distribución eficiente de nutrientes esenciales para el crecimiento algal (Mehar et al., 2019; Vonshak, 1997).

El desarrollo óptimo de *Arthrospira platensis* en estos sistemas depende de la interacción de múltiples factores ambientales: intensidad y duración de la radiación solar, temperatura ideal entre 30 y 35 °C, pH alcalino (9-11), disponibilidad equilibrada de nutrientes inorgánicos (nitrato, fosfato, hierro y bicarbonato) y una aireación constante que garantice una adecuada transferencia de gases,

especialmente dióxido de carbono, necesario para la fotosíntesis (Abomohra et al., 2016; Ríos et al., 2021).



Figura 1. Cultivo en estanques tipo *raceway* (Castro, 2022)

El medio de cultivo más comúnmente utilizado es el medio Zarrouk, formulado para promover el crecimiento de *Spirulina* bajo condiciones alcalinas. Este contiene carbonatos y bicarbonatos como fuente de carbono inorgánico, además de nitratos, fosfatos, sulfatos y micronutrientes esenciales. La profundidad del canal, usualmente entre 15 y 25 cm, es un parámetro crítico: permite una penetración eficiente de la luz, evitando tanto la fotoinhibición en la superficie y la limitación lumínica en las capas profundas (Torzillo & Vonshak, 2013).

La constante agitación del medio desempeña funciones esenciales: mantiene las células suspendidas, previene la sedimentación y asegura una distribución homogénea de nutrientes y luz, optimiza el intercambio de gases en el ambiente y favorece a una temperatura más homogénea en el sistema (Richmond & Hu, 2013) (Figura 2).

Debido a sus ventajas, los sistemas *raceway* tienen limitaciones propias de su condición abierta, como susceptibilidad a la contaminación microbiológica,

variaciones térmicas, evaporación excesiva y pérdida de nutrientes. Sin embargo, en Latinoamérica se han puesto en marcha innovaciones significativas, tales como la incorporación de estos sistemas a recirculaciones acuícolas (RAS, por sus siglas en inglés), la reestructuración hidrodinámica y el uso de materiales resistentes a la corrosión, lo que ha permitido incrementar la eficiencia, reducir gastos de producción y potenciar la bioseguridad (Henríquez & Escobar, 2020; Mehar et al., 2019).

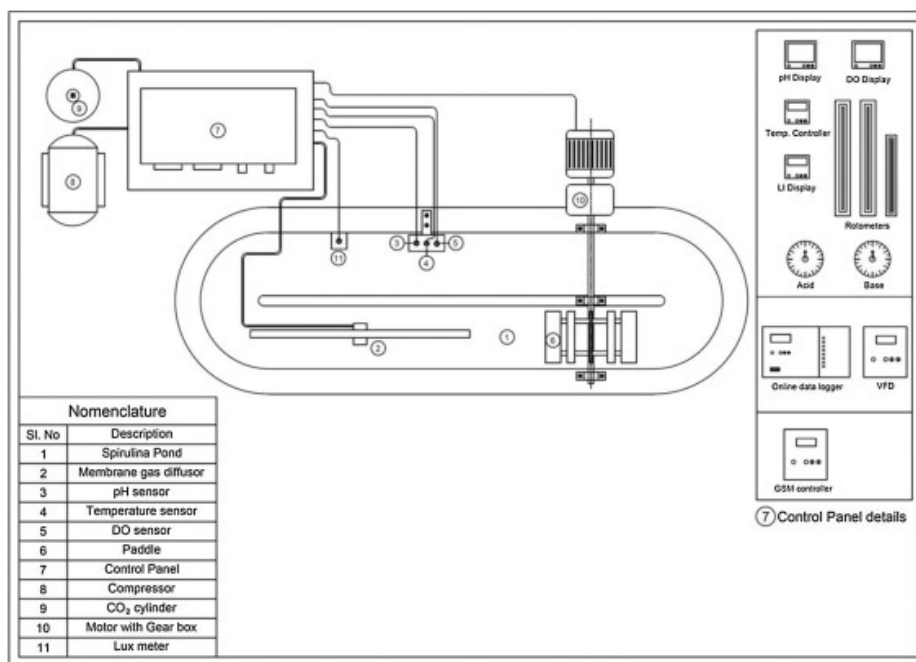


Figura 2. Estanque de canal abierto a escala piloto (Mehar, 2019)

Cultivos en fotobiorreactores

La implementación de fotobiorreactores representa un progreso significativo en la biotecnología de microalgas. Estos sistemas cerrados posibilitan un control estricto de factores cruciales como la calidad de luz, intensidad, pH, concentración de dióxido de carbono, temperatura y disponibilidad de nutrientes. Esto resulta en mayores tasas de productividad, una reducción de contaminación y la posibilidad de orientar la producción hacia metabolitos específicos de gran valor (Guzmán et al., 2020).

La capacidad de los fotobiorreactores se basa en su adaptabilidad para enfrentar desafíos ambientales y energéticos a nivel mundial. En la actualidad, se realizan estudios para la producción de biocombustibles de tercera generación, considerados como opciones sostenibles frente a los combustibles fósiles (Chisti, 2007). Asimismo, estos mecanismos facilitan la producción de bioplásticos, enzimas, y otros compuestos bioactivos empleados en las industrias de alimentos, cosmética y farmacéutica (Spolaore et al., 2006).

A pesar del potencial del cultivo de *Spirulina*, su producción a nivel industrial aún enfrenta retos económicos y técnicos. Entre ellos se destacan la optimización del diseño para maximizar la absorción lumínica, la reducción del consumo energético (principalmente asociado al bombeo y control térmico), la prevención de bioincrustaciones y la integración efectiva con sistemas de recolección de biomasa (Castillo et al., 2017).

5.2.2 Parámetros críticos de cultivo

El éxito en el cultivo de *Arthrospira platensis*, tanto en sistemas abiertos como cerrados, depende del control riguroso de factores ambientales y operacionales. La luz, medio energético fundamental para la fotosíntesis, requiere una regulación meticulosa en factores como su intensidad, espectro y fotoperiodo. Un alto nivel de intensidad puede provocar fotoinhibición, mientras que un nivel bajo limita la productividad. El espectro lumínico incide en la eficiencia fotosintética y en la composición bioquímica de la biomasa, mientras que el fotoperiodo o ciclo de luz – oscuridad regula procesos metabólicos y el ritmo del crecimiento celular (Richmond & Emérito, 2013).

Un mezclado eficaz del cultivo es indispensable para garantizar la uniformidad del medio, la distribución equitativa de nutrientes y luz, y la prevención de la sedimentación. Las técnicas de agitación, mecánicas o neumáticas, deben equilibrar la eficiencia energética con la minimización del estrés hidrodinámico sobre las células.

La disponibilidad de dióxido de carbono es esencial para la fijación fotosintética. Por ello, los sistemas para su inyección y difusión deben asegurar una disolución eficiente y uniforme, reduciendo pérdidas y garantizando una concentración adecuada para todas las células del cultivo (Iamtham & Sornchai, 2022). Asimismo, el control del pH influye en la disponibilidad de nutrientes y la actividad enzimática (Chisti, 2007).

La formulación del medio de cultivo, que debe incluir macro y micronutrientes en proporciones balanceadas, es un determinante crítico del crecimiento. Además, es necesario controlar la concentración del oxígeno disuelto, ya que niveles excesivos pueden ser inhibitorios. Finalmente, la prevención de contaminaciones microbianas (bacterias, hongos y protozoos) requiere sistemas cerrados, técnicas asépticas y protocolos de esterilización para preservar la estabilidad de cultivo (Navarrete et al., 2024).

5.2.3 Casos representativos en países de Latinoamérica

México constituye uno de los casos más emblemáticos de producción de *Arthrospira platensis* en Latinoamérica. Ya en época prehispánica, los aztecas recolectaban esta cianobacteria, conocida como *tecuítlatl*, directamente del Lago de Texacoco, bajo crecimiento natural en aguas alcalinas (Avalos et al., 2018).

La domesticación del recurso llevó al desarrollo de sistemas rudimentarios de cultivo: estanques artificiales poco profundos, dispuesto en estructuras rectangulares conectadas por canales que facilitaban el flujo del agua mediante ruedas de paletas. Estos sistemas empleaban agua de pozo enriquecida con minerales esenciales (nitrógeno, magnesio, calcio, zinc, hierro y manganeso) y dependían de la luz solar como fuente de energía para la fotosíntesis (Avalos et al., 2018).

Actualmente, la producción comercial de *Arthrospira* en México se estructura en varias etapas: conservación de cepas en laboratorio, desarrollo de inóculos en sistemas cerrados, cultivo intensivo en estanques abiertos, cosecha mediante filtración, lavado, homogeneización, secado por aspersion y posterior empaque del polvo seco para su distribución (Avalos et al., 2018). Este método evidencia una transición desde prácticas tradicionales hacia procesos industriales estandarizados, con control de calidad y escalabilidad.

Un caso relevante en Perú es el Proyecto Nutricional de San Clemente, liderado por Ripey D. Fox, iniciado en 1986 con apoyo de la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI), donaciones francesas y el respaldo de Earthrise Farms. El objetivo era combatir la desnutrición en zonas áridas cercanas a Pisco. Aunque la descripción del sistema no es explícita, las condiciones geográficas y la tecnología empleada sugieren el uso de estanques abiertos tipo *raceway* (Butorri & Di Ruscio, 2006).

En 1988, el proyecto distribuyó *Arthrospira* en comedores comunitarios e identificó una cepa adaptada a entornos salinos, *Spirulina subsalsa*, con potencial para cultivo en agua marina. Esta línea de investigación marcó la tendencia actual hacia la búsqueda de sostenibilidad en ambientes extremos. No obstante, conflictos

sociopolíticos llevaron a la disolución de la iniciativa ese mismo año, ilustrando la vulnerabilidad de estos proyectos ante factores externos.

En Argentina, el descubrimiento de poblaciones naturales de *Arthrospira* en lagunas de Jujuy, realizado por Joaquin Frenguelli en 1973, sentó un precedente biológico para su cultivo en condiciones naturales (Buttori & Di Ruscio, 2006). A partir de este hallazgo, se despertó el interés científico y comercial por aprovechar las condiciones locales favorables al desarrollo de la cianobacteria.

En 1994, la empresa Hydro Farming S.A. emprendió el cultivo industrial de *Arthrospira platensis* en estanques abiertos tipo raceway, enfrentando múltiples desafíos técnicos. Según Buttori y Di Ruscio (2006), "es relativamente sencillo cultivar esta cianobacteria bajo condiciones controladas de laboratorio, pero llevarlo a cabo en estanques reales conlleva ciertos obstáculos", entre ellos la variabilidad climática y el riesgo de contaminación ambiental.

Hydro Farming S.A. tuvo que sembrar repetidamente *Arthrospira platensis* (cinco o seis veces) antes de lograr su adaptación al entorno local. Este proceso implicó ajustes empíricos en la composición del medio de cultivo, el pH, la temperatura y la intensidad lumínica, buscando replicar las condiciones del medio Zarrouk modificado, óptimas para su crecimiento.

La cepa empleada, *A. platensis* del Lago Chad, requirió una selección adaptativa progresiva y la optimización de las condiciones de cultivo. Además, el procesamiento postcosecha, aunque no detallado en las fuentes, incluyó técnicas como secado por aspersión y de compresión, necesarias para garantizar la calidad nutricional del polvo y los comprimidos (Ambati et al., 2019).

Uno de los principales retos de Hydro Farming fue su inserción en el mercado local, debido al escaso conocimiento del consumidor sobre los beneficios de la *Spirulina*. Esta situación subraya que el éxito de los cultivos no depende únicamente de la viabilidad técnica o biológica, sino también de estrategias de marketing, educación y comunicación nutricional dirigidas a la población objetivo.

La empresa Campo Esmeralda SRL, fundada en 2003 en Argentina, representa un avance tecnológico en el cultivo de *Arthrosira platensis*. La implementación de estanques protegidos por invernaderos permitió un mejor control de temperatura y redujo la evaporación, mitigando las limitaciones de los sistemas abiertos (Sallam et al., 2020).

Su enfoque experimental incluyó varios ensayos con diferentes métodos de ventilación, aireación y posiblemente iluminación, lo que evidencia un interés por adaptar las técnicas al entorno específico. Además, su colaboración con el Instituto de Física de Rosario (IFIR-CONICET) para mejorar procesos de desecado señala una inversión concreta en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

Campo Esmeralda desarrolló una línea de comprimidos de *Arthrosira* enriquecidos con vitamina C, lo que mejora la biodisponibilidad del hierro presente en el producto. Esta innovación representa una estrategia de valor añadido basada en principios de nutrición funcional y evidencia un enfoque hacia el mercado de los nutracéuticos (Finamore et al., 2017).

5.2.4. Medios de cultivo y eficiencia productiva

El medio Zarrouk se ha consolidado como el estándar de referencia para el cultivo de *Arthrospira platensis* y otras cianobacterias alcalófilas, debido a su capacidad para sostener un crecimiento eficiente y selectivo. Su formulación original, propuesta por Zarrouk (1966), establece un equilibrio preciso entre macronutrientes y micronutrientes. La composición típica incluye concentraciones elevadas de carbonatos y bicarbonatos, especialmente bicarbonato de sodio, que actúan como fuente principal de carbono inorgánico para la fotosíntesis y como reguladores de pH, manteniéndolo en un rango alcalino óptimo entre 9.0 y 10.0. Esta condición es crucial para *A. platensis*: limita el desarrollo de microorganismos contaminantes y favorece su competitividad en cultivos abiertos (Rezvani et al., 2022).

Además, el medio incluye nitrato de sodio como fuente de nitrógeno, fosfato dipotásico como fuente de fósforo y cloruro de sodio, así como una mezcla de micronutrientes esenciales como hierro, manganeso, zinc, boro y cobre, necesarios para funciones enzimáticas y procesos metabólicos (Richmond, 2022). La eficacia del medio Zarrouk se refleja en sus altas tasas de crecimiento, tolerancia a cierto grado de descontaminación y elevada acumulación de biomasa, consolidándose como un modelo base en estudios de optimización de cultivos (Rezvani et al., 2022).

No obstante, el alto costo del medio Zarrouk puede dificultar su aplicación a gran escala, especialmente en contextos de economías emergentes. Por ello, en América Latina se han desarrollado variantes que sustituyen componentes costosos por insumos locales más accesibles. Por ejemplo, en México y Brasil se ha investigado el uso de aguas residuales tratadas, derivadas de fuentes domésticas, agrícolas o industriales, tras procesos de pretratamiento para eliminar patógenos y contaminantes (Ali et al., 2022).

Estas variantes contribuyen a reducir el costo de producción y, al mismo tiempo, potencian la biorremediación de efluentes. Algunas estrategias adicionales incluyen la sustitución parcial de sales inorgánicas por fertilizantes agrícolas comerciales, ajustando sus concentraciones para evitar toxicidad y cubrir los requerimientos nutricionales de *A. platensis* (Junique et al., 2021). Resulta indispensable realizar comparaciones sistemáticas entre estas formulaciones y el medio Zarrouk estándar, considerando tanto el rendimiento productivo como la calidad bioquímica de la biomasa y la viabilidad económica en condiciones piloto e industriales (Apurav et al., 2019).

En línea con la búsqueda de sostenibilidad, también se ha explorado el uso de medios alternativos de bajo costo, basados en insumos agroindustriales o residuos orgánicos. Esta estrategia de economía circular resulta especialmente atractiva en países latinoamericanos con fuerte base agrícola. Ejemplos incluyen melaza como subproducto de la caña de azúcar, urea como fuente económica de nitrógeno, ceniza volcánica rica en minerales, de interés particular en Ecuador, y efluentes de piscicultura o digestores anaerobios (Wagh et al., 2024). Estos medios han mostrado resultados prometedores en cuanto a productividad comparable al medio Zarrouk, además de valorizar residuos que, de otro modo, serían desechados. Sin embargo, estos medios alternativos suelen requerir pretratamientos para minimizar la contaminación microbiana y asegurar la calidad de la biomasa generada, el contenido de ficocianina, lípidos y otros compuestos funcionales (Ahmad & Ashraf, 2023).

Las tendencias actuales en la formulación de medios de cultivo apuntan a minimizar el impacto ambiental mediante el uso de formulaciones recicladas,

derivadas de sistemas de tratamientos de aguas residuales o subproductos de fermentación como extractos de levadura. Estos enfoques no solo reducen costos y consumo de recursos vírgenes, sino que también integran el cultivo de *A. platensis* dentro de modelos de bioeconomía circular (Ahmad & Ashraf, 2023).

La estandarización de medios alternativos enfrenta desafíos significativos a escala industrial. La variabilidad en la composición de residuos puede provocar fluctuaciones en el crecimiento y la calidad de la biomasa, en contraste con la consistencia de medios químicos definidos (Soudagar et al., 2024). Para enfrentar esta variabilidad, se están incorporando tecnologías emergentes como sensores digitales y algoritmos de inteligencia artificial que permiten ajustar la composición del medio en tiempo real (Imamoglu, 2024). Sin embargo, resulta crucial verificar la seguridad y calidad nutricional de la biomasa producida, para obtener la aceptación en el mercado y acatar las normativas de salud (Ghasemi et al., 2018).

5.3 POTENCIAL DE APLICACIÓN EN ECUADOR: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

La creciente necesidad de modelos sostenibles de producción y consumo en Ecuador plantea el desafío de identificar y aprovechar recursos biológicos de alto valor estratégico. En este contexto, *Arthrospira platensis* representa una alternativa viable para contribuir al fortalecimiento de la seguridad alimentaria, el desarrollo de biotecnologías aplicadas y la mitigación de impactos ambientales. Este apartado analiza su viabilidad desde diversas dimensiones, incluyendo la disponibilidad de recursos, los requerimientos técnicos y sanitarios para su producción, sus posibles aplicaciones basadas en propiedades microbiológicas y los riesgos asociados, así como los marcos regulatorios que rigen su uso en el país.

5.3.1 Condiciones ecológicas y socioeconómicas locales

Ecuador, como país megadiverso ubicado en la región ecuatorial, presenta una gran variedad de condiciones ecológicas y socioeconómicas que ofrecen un panorama favorable para el cultivo de *Arthrospira platensis*. Su ubicación geográfica proporciona una radiación solar elevada y constante durante todo el año, un factor esencial para la fotosíntesis de esta cianobacteria. Regiones como la Costa y la Amazonia, con temperaturas promedio entre 25 y 35° C, se perfilan como idóneas para la implementación de sistemas de cultivo abiertos, como los estanques tipo *raceway*, que resultan más rentables para la producción a gran escala (Richmond, 2022).

Estas condiciones climáticas reducen significativamente la necesidad de calefacción o iluminación artificial, lo que reduce los costos energéticos y la huella de carbono del proceso productivo. Sin embargo, la disponibilidad de agua dulce en el territorio ecuatoriano varía considerablemente: mientras que en la Amazonia es abundante, en regiones de la Sierra y la Costa pueden presentarse restricciones hídricas (Pourrut, 2004). Por ello, la incorporación de tecnologías de reciclaje de agua y el uso de fuentes no convencionales, como aguas residuales tratadas o ligeramente salobres, se vuelve esencial para garantizar la sostenibilidad hídrica del sistema. Asimismo, existen áreas marginales no aptas para cultivos convencionales que podrían destinarse a la instalación de fotobiorreactores o estanques, permitiendo la valorización de suelos subutilizados y evitando conflictos con la agricultura tradicional. La diversidad de microclimas en Ecuador abre además la posibilidad de adaptar tecnologías de cultivo a distintas altitudes y condiciones locales (Pourrut, 2004).

Desde una perspectiva socioeconómica, el cultivo de *Arthrospira* en Ecuador representa una oportunidad de diversificar la matriz productiva agrícola y generar empleo en zonas rurales, contribuyendo así a frenar la migración del campo a la ciudad. Las granjas de producción pueden generar empleos directos en actividades como el cultivo, procesamiento y empaquetado, así como empleos indirectos en la logística y comercialización. Por otro lado, el alto valor nutricional de *Arthrospira*, con contenidos de hasta un 70 % de proteína en peso seco, vitaminas del complejo B, minerales como hierro y magnesio, y compuestos bioactivos como la ficocianina y el betacaroteno, la posiciona como un recurso clave para contribuir a la seguridad alimentaria y combatir la desnutrición, especialmente en poblaciones vulnerables (Podgórska, 2024). Su inclusión en programas alimentarios o como suplemento económico y accesible podría constituir una estrategia nutricional sostenible y de alto impacto.

La creciente demanda de alimentos funcionales y suplementos nutricionales a nivel global y local abre un nicho de mercado prometedor para *Arthrospira* en Ecuador, tanto para el consumo interno como para su exposición, siempre que se cumplan los estándares de calidad y las certificaciones internacionales requeridas. Esta posibilidad genera oportunidades para la generación de valor agregado y la inserción del país en cadenas globales de suministro de bioproductos. Sin embargo, la implementación a gran escala enfrenta desafíos significativos. En varias zonas rurales persisten limitaciones en infraestructura tecnológica, acceso a energía eléctrica confiable y disponibilidad de agua tratada, lo que podría obstaculizar la adopción de tecnologías modernas de cultivo. Además, se requiere la formación de talento humano capacitado en técnicas específicas para el manejo de microalgas, lo que demanda programas de capacitación técnica e iniciativas de cooperación con centros de investigación especializados (Muñoz et al., 2021).

Otro desafío relevante es el acceso a financiamiento para las inversiones iniciales en infraestructura y equipos, especialmente para pequeños y medianos productores. Esto subraya la importancia de contar con mecanismos de crédito, subsidios o fondos de innovación que impulsen la producción biotecnológica nacional. Asimismo, es fundamental que las políticas públicas respalden la investigación, el desarrollo y la innovación en biotecnología y acuicultura sostenible. Finalmente, la aceptación cultural de los productos derivados de microalgas, que no forman parte del repertorio alimentario tradicional de Ecuador, requerirá estrategias de educación y sensibilización dirigidas al consumidor, enfatizando sus beneficios nutricionales, su sostenibilidad y su inocuidad. Confirmar la caracterización de cepas locales, junto estudios que certifiquen su calidad y seguridad, será clave para generar confianza en el mercado (Muñoz et al., 2021).

5.3.2 Análisis de viabilidad técnica y sanitaria

La viabilidad técnica de la producción de *Arthrospira platensis* en Ecuador se fundamenta en la adaptación y optimización de los sistemas de cultivo a las condiciones ambientales específicas del país. Esto implica el diseño estratégico de fotobiorreactores o estanques tipo *raceway* que aprovechen la alta radiación solar característica de las regiones ecuatoriales, al tiempo que mantengan un control adecuado de la temperatura para evitar el sobrecalentamiento, un desafío frecuente en climas tropicales que puede afectar negativamente la calidad y el rendimiento de la biomasa (Sathinathan et al., 2023). La elección entre sistemas abiertos y cerrados depende de factores como la escala de producción, los requerimientos de bioseguridad, la eficiencia en el uso de recursos y la inversión inicial disponible. Aunque los sistemas cerrados ofrecen mayor control y reducen el riesgo de

contaminación, los sistemas abiertos resultan más rentables para la producción de biomasa a gran escala (Richmond, 2022). La sostenibilidad técnica también requiere de estrategias avanzadas para el reciclaje del medio de cultivo y la incorporación de tecnologías automatizadas de monitoreo, incluyendo herramientas de inteligencia artificial, que permitan ajustar las condiciones de cultivo en tiempo real y maximizar la productividad (Syed et al., 2024).

La inteligencia artificial (IA) brinda beneficios significativos para supervisar el cultivo de *Arthrospira platensis*, revolucionando la gestión de sistemas de producción. A través de algoritmos de aprendizaje automático, la IA posibilita un seguimiento en tiempo real y una supervisión predictiva muy eficaz de parámetros vitales como el pH, la cantidad de nutrientes, la temperatura, la densidad y la intensidad de luz.

Esto puede ir más allá de la automatización existente, ya que la IA tiene la capacidad de examinar grandes cantidades de información para reconocer patrones complejos, anticipar condiciones ideales de crecimiento o identificar las condiciones óptimas de crecimiento, además de identificar irregularidades con antelación, lo que posibilita hacer modificaciones en el medio de crecimiento o en las condiciones del entorno. La IA disminuye considerablemente los errores humanos, mejorando constantemente los parámetros para incrementar la productibilidad y la calidad de la biomasa.

Desde la perspectiva sanitaria, la producción de *Arthrospira* destinada al consumo humano o animal debe cumplir estrictamente con) las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) a lo largo de toda la cadena de producción, desde el cultivo hasta la cosecha y el procesamiento. Los principales riesgos microbiológicos incluyen la contaminación por bacterias

patógenas o la proliferación de otras cianobacterias capaces de producir cianotoxinas, como microcistinas o anatoxinas que, aunque no son generadas por *Arthrospira*, pueden aparecer en cultivos contaminados (Pham et al., 2023). Adicionalmente, la presencia de metales pesados como plomo, cadmio o arsénico, así como de contaminantes orgánicos como pesticidas, constituye una amenaza significativa cuando se utilizan aguas o nutrientes que no cumplen los estándares de calidad. Por ello, se requiere establecer sistemas rigurosos de control de calidad que incluyan análisis microbiológicos, fisicoquímicos y toxicológicos periódicos del agua, del medio de cultivo y de la biomasa recolectada, siguiendo las normativas nacionales e internacionales. En el caso ecuatoriano, estas regulaciones corresponden a la Agencia Nacional de Regulación, Control y Supervisión Sanitaria (ARCSA) y a las Normas Técnicas Ecuatorianas (INEN) aplicables a alimentos y suplementos (ARCSA, 2021).

A pesar de no contar con una fuente específica que detalle las acciones de Ecuador para *Arthrospira*, suelen abarcar seguimientos mensuales de coliformes totales y *Escherichia coli* (Cipriani et al., 2020). Para el agua existen evaluaciones anuales de metales pesados como el plomo y el arsénico y exámenes de identificación de cianotoxinas si se presume una contaminación cruzada por cianobacterias (España & Gómez, 2024).

La implementación de sistemas de trazabilidad es fundamental para garantizar la inocuidad alimentaria y cumplir con los requerimientos regulatorios internacionales. La trazabilidad permite rastrear el producto desde la materia prima utilizada hasta el consumidor final, facilitando la identificación y gestión oportuna de posibles incidentes relacionados con la calidad o la seguridad alimentaria del producto (European Union, 2002). Para la exportación, Ecuador necesita adoptar

normas de estándares exigidos por la Unión Europea (Reglamento 178/2002), las regulaciones de La FDA de Estados Unidos y las pautas del *Codex alimentarius*, que definen principios de higiene y rastreabilidad a nivel mundial, esenciales para su entrada a los mercados globales (ONU, 2023). Además de asegurar la excelencia del producto, la gestión ambiental debe considerar la adecuada disposición de efluentes para evitar la eutrofización en cuerpos de agua cercanos, así como la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero si se emplean fuentes de dióxido de carbono no sostenibles. La implementación de sistemas de reciclaje de nutrientes y tecnologías que optimicen el uso de recursos contribuyen significativamente a la sostenibilidad integral del cultivo de *Arthrospira* (Zieliński et al., 2023).

La expansión de la producción de *Arthrospira* en Ecuador requiere un análisis financiero integral que contemple la inversión inicial en infraestructura (adquisición de tierras, construcción de estanques o instalación de fotobiorreactores), así como los costos operativos recurrentes (personal, energía, agua, nutrientes, mantenimiento) y la viabilidad de inserción en mercados locales e internacionales. Un factor limitante clave para el éxito a largo plazo es la disponibilidad de personal capacitado en el cultivo, manejo y procesamiento de microalgas. En este sentido, la inversión en programas de formación profesional y el establecimiento de alianzas entre instituciones académicas, gubernamentales y centros de investigación internacionales resultan fundamentales para el desarrollo del capital humano necesario.

Actualmente en Ecuador la capacitación en biotecnología de microalgas abarca diversas modalidades, instituciones internacionales como el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y plataformas

como Cognita Conecta que ofrecen cursos que abarcan desde métodos de aislamiento y preservación de cepas a la mejora de cultivo a escala industrial y métodos avanzados que incursionan en la genética y vías metabólicas (Cognita Conecta, s/f). Varias instituciones universitarias de Ecuador participan activamente en la investigación sobre microalgas, lo que resulta en posibilidades de capacitación mediante proyectos (Yachaytech, 2016).

Superar los desafíos técnicos, sanitarios y económicos permitirá consolidar la producción de *Arthrospira* como una industria biotecnología viable y sostenible, con aportes concretos a la seguridad alimentaria y al crecimiento económico del país (OCDE, 2009).

5.3.3 Posibles aplicaciones con base microbiológica

Ecuador, reconocido por su megadiversidad biológica, posee un vasto potencial para el desarrollo de aplicaciones biotecnológicas basadas en microorganismos. *Arthrospira platensis*, como microalga de alto valor nutricional y metabólico, representa una herramienta estratégica para en la transición hacia modelos productivos sostenibles, con aplicaciones en agricultura, energía y remediación ambiental. La diversidad microbiana del país, aún subexplorada, constituye una fuente invaluable de cepas autóctonas con potencial biotecnológico (Paucar et al., 2011).

En el ámbito de la agricultura sustentable, los microorganismos son aliados clave para sustituir insumos agroquímicos convencionales. Biofertilizantes formulados con bacterias nitrificantes y solubilizadoras de fósforo pueden reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuir la contaminación de cuerpos de agua y mitigar las emisiones asociadas a su producción. En Ecuador, estudios como

el de Ver et al. (2020) han demostrado mejoras significativas en la productividad del maíz mediante el uso de biofertilizantes en la región costera. Además, instituciones académicas están caracterizando cepas nativas adaptadas a diversos suelos, desde los andinos volcánicos hasta los ácidos amazónicos (Muñoz et al., 2021).

En el campo de la biorremediación, *A. platensis* ha mostrado capacidad para absorber y transformar metales pesados como cadmio, mercurio, cromo y plomo presentes en cuerpos de agua contaminados. Estudios recientes en Ecuador han evaluado microorganismos nativos con fines biorremediadores en suelos y aguas impactadas por la minería, siendo *Arthrospira* una posible aliada en estos procesos (Vizúete et al., 2021). Además, su eficiencia en la asimilación de nitrógeno y fósforo la convierte en una opción prometedora para el tratamiento de aguas residuales, integrando estrategias de economía circular donde los residuos son transformados en biomasa útil.

Desde una perspectiva industrial, *A. platensis* es una fuente importante de compuestos bioactivos. La ficocianina, su pigmento azul verdoso con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y neuroprotectoras, tiene aplicaciones en las industrias alimentaria, cosmética y farmacéutica (Ochoa & Moyano, 2022). El establecimiento de una industria de extracción y purificación de ficocianina en Ecuador podría agregar valor a la biomasa y dinamizar la economía local. Asimismo, los péptidos bioactivos derivados de la hidrólisis de proteínas de *Arthrospira* son objeto de investigación por sus efectos antihipertensivos y antioxidantes (Hernández et al., 2015), lo que abre oportunidades en el desarrollo de suplementos y productos funcionales farmacéuticos novedosos.

5.3.4 Riesgos microbiológicos y aspectos regulatorios

Si bien *Arthrospira platensis* posee un historial de uso seguro en la alimentación humana y animal, su producción a gran escala en Ecuador requiere una evaluación rigurosa de los riesgos microbiológicos, ambientales y normativos asociados. Entre los principales riesgos se encuentran la contaminación de los cultivos por microorganismos patógenos o cianobacterias productoras de toxinas, como microcistinas y anatoxinas, que pueden proliferar si las condiciones de cultivo no son adecuadas (Secretaría, 2023). Adicionalmente, la acumulación de metales pesados como plomo, cadmio y arsénico, y contaminantes orgánicos derivados de fuentes hídricas o insumos contaminados, representa un riesgo sanitario significativo.

Para mitigar estos riesgos, se requiere un marco regulatorio robusto y específico. La Constitución del Ecuador, en su Artículo 401, establece el principio de precaución para evitar impactos sobre la salud y la biodiversidad (Asamblea Nacional, 2008). Aunque *A. platensis* no es un organismo genéticamente modificado, está sujeta a la Ley Orgánica de la Agrodiversidad, Semillas y Fomento de la Agricultura Sustentable (2017), así como a las normativas del Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica y el Ministerio de Salud Pública. Las actividades productivas deben cumplir con los requisitos de calidad, trazabilidad e inocuidad establecidos por el ARCSA y las normas INEN para alimentos y suplementos.

La implementación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) y protocolos de evaluación de riesgos en puntos críticos (HACCP) es indispensable durante todas las etapas del cultivo, cosecha, secado, almacenamiento y comercialización. Esto incluye la selección de fuentes seguras de agua y nutrientes, el monitoreo constante de parámetros fisicoquímicos del cultivo (temperatura, pH, salinidad) y la detección temprana de contaminantes biológicos. La capacitación

continua del personal, junto a medidas de biocustodia y control de calidad, garantiza la seguridad del producto final y la confianza del consumidor (Luo et al., 2024).

Por último, la identificación del proceso productivo, desde la materia prima hasta el consumidor final, es una condición tanto legal como técnica. Esta supervisión permite una respuesta de forma eficiente ante posibles problemas de calidad o seguridad, protegiendo la salud pública y potenciando la imagen del producto nacional en mercados mundiales (European Union, 2002).

6. CONCLUSIONES

Arthrospira platensis es una cianobacteria de alto valor nutricional y biotecnológico cuyo cultivo requiere condiciones fisicoquímicas específicas como luz solar, pH alcalino, dióxido de carbono y nutrientes balanceados, y medios de cultivo bien formulados, como el Zarrouk. Su composición rica en proteínas, minerales y compuestos bioactivos como la ficocianina le confiere aplicaciones relevantes en los ámbitos alimentario, farmacéutico y ambiental.

Los sistemas de cultivo tipo *raceway* son una opción viable y de bajo costo para la producción a gran escala, aunque presentan riesgos de contaminación. Por su parte, los fotobiorreactores ofrecen mayor control y productividad, requieren mayor inversión y experiencia técnica. En América Latina, experiencias exitosas en México, Perú y Argentina han demostrado cómo estas tecnologías pueden adaptarse a diferentes contextos, promoviendo su industrialización. Además, se han desarrollado variantes del medio Zarrouk que emplean residuos agroindustriales o efluentes tratados para reducir costos y aumentar la sostenibilidad.

En Ecuador, el cultivo de *Arthrospira* tiene alto potencial debido a factores como alta radiación solar, temperaturas favorables y disponibilidad de terrenos no agrícolas. El uso de insumos alternativos y tecnologías de reciclaje puede contribuir a una producción más eficiente y sostenible. No obstante, se requiere fortalecer los sistemas de control de calidad, adaptar las tecnologías a los diversos microclimas del país y garantizar la inocuidad de la biomasa para lograr la aceptación en el mercado.

Las aplicaciones microbiológicas de *Arthrospira* como biofertilizante, agente de biorremediación o fuente de compuestos funcionales, representan una oportunidad estratégica para el desarrollo biotecnológico nacional. Para su implementación exitosa, es

imprescindible contar con marco normativo robusto, medidas de bioseguridad, trazabilidad en la cadena de producción y fuerza laboral capacitada. Estas condiciones son clave para maximizar beneficios, reducir riesgos y aprovechar de forma responsable el capital biológico del país.

En este escenario es crucial establecer sistemas que posibiliten el seguimiento del producto desde su origen hasta el consumidor final para asegurar la seguridad en los alimentos. Además, la capacitación del personal técnico experto en microalgas y bioprocesos es esencial para mantener el desarrollo del sector y garantizar el acatamiento de las regulaciones. Estos elementos son fundamentales para maximizar los beneficios de la biotecnología microbiana, minimizar sus riesgos y preservar la biodiversidad única del país (Luo et al., 2024).

7. RECOMENDACIONES

Con base en el análisis de factibilidad técnica, sanitaria y socioeconómica del cultivo de *Arthrospira platensis* en Ecuador, así como en la revisión de experiencias en América Latina, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas al fortalecimiento de esta industria emergente:

1. Es prioritario fortalecer líneas de investigación centradas en la optimización de sistemas de cultivo que utilicen insumos de bajo costo y reduzcan el impacto ambiental. Se recomienda explorar el uso de medios de cultivo alternativos basados en subproductos agroindustriales, como melaza de caña de azúcar, residuos frutales y efluentes previamente tratados, por ejemplo, aguas residuales municipales o efluentes provenientes de la piscicultura.

2. Resulta esencial armonizar las normativas nacionales emitidas por ARCSA e INEN respecto al uso de *Spirulina* (o *Arthrospira*) como alimento o suplemento, alineaéndolas con referentes internacionales como el *Codex Alimentarius* (FAO/WHO), la FDA (FSMA) y el Reglamento (CE) n. 178/2002 de la Unión Europea. Este paso es clave para facilitar su inserción en mercados internacionales. Además, se requiere establecer y supervisar rigurosamente la implementación de Buenas Prácticas Agrícolas y de Manufactura (BPA y BPM) y sistemas de trazabilidad, desde la obtención de la materia prima hasta el consumidor final, garantizando la inocuidad y calidad del producto y permitiendo respuestas eficaces ante posibles alertas sanitarias.

3. Se recomienda incentivar políticas que promuevan la inversión pública y privada en infraestructura adecuada para la producción, procesamiento y comercialización de *A. platensis*. Esto incluye la implementación de tecnologías adaptadas a las condiciones locales, la capacitación técnica del personal involucrado y el fortalecimiento de mecanismos

que aseguren el cumplimiento de normativas sanitarias y de calidad. Estas acciones contribuirán al posicionamiento de *Spirulina* como un recurso estratégico para la seguridad alimentaria y el desarrollo de la bioeconomía en el país.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abomohra, A. E. F., Eladel, H., El-Haroun, E. R., & Rayan, M. A. (2016). Effect of different cultivation conditions on growth and biochemical composition of the microalga *Arthrospira (Spirulina) platensis*. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2016.07.003>
- Ahmad, A., & Ashraf, S. (2023). Sustainable food and feed sources from microalgae: Food security and the circular bioeconomy. *Algal Research*, 74(103185), 103185. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103185>
- Albarracín, J. (2022). Impacto ambiental del cultivo de *Spirulina* en Ecuador: Un análisis de la sostenibilidad del recurso hídrico. *Revista Ecuatoriana de Biotecnología*, 11(2), 45-57.
- Ali, S., Mastropetros, S., Schagerl, M., Sakarika, M., Elsamahy, T., Sheekh, M., Sun, J., & Kornaros, M. (2022). Recent advances in wastewater microalgae-based biofuels production: A state-of-the-art review. *Energy Reports*, 8, 13253–13280. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.143>
- Apurav, K., Show, P., Guo, R., Tang, B., Ogino, C., & Chang, J. (2019). Bio-processing of algal bio-refinery: a review on current advances and future perspectives. *Bioengineered*, 10(1), 574–592. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1679697>
- Arias, M. (2010). Estudio de las condiciones óptimas de cultivo de *Spirulina platensis* en América Latina. *Journal of Algal Studies*, 25(3), 123-135.
- Arcsa. (2021). NORMATIVA SANITARIA PARA CONTROL DE SUPLEMENTOS ALIMENTICIOS. Gob.ec. https://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/01/ARCSA-DE-028-2016-YMIH_NORMATIVA-SANITARIA-PARA-CONTROL-DE-SUPLEMENTOS-ALIMENTICIOS..pdf
- ASAMBLEA NACIONAL. (2017). LEY ORGANICA DE AGROBIODIVERSIDAD, SEMILLAS Y FOMENTO DE AGRICULTURA. Gob.ec. <https://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2018/05/Ley-Organica-Agrobiodiversidad-Semillas-y-Fomento-de-Agricultura.pdf

- Ávalos, H., Cázarez, E. y Rodríguez, K. (2018). *Espirulina El potencial biotecnológico y alternativo de un alimento poco convencional*. Edu.mx. [https://ucemich.edu.mx/Documentos/2022/Investigacion/publicaciones/junio/180328_Spirulina%20autorizado%20para%20imprimir%20por%20favor%20copia%20\(1\).pdf](https://ucemich.edu.mx/Documentos/2022/Investigacion/publicaciones/junio/180328_Spirulina%20autorizado%20para%20imprimir%20por%20favor%20copia%20(1).pdf)
- Belay, A. (1997). Mass culture of *Spirulina* outdoors — the Earthrise Farms experience. In A. Vonshak (Ed.), *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology* (pp. 131–158). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781482295305>
- Castillo, O., Torres, S., Núñez, C., Peña, V., Méndez, C., & Rodríguez, J. (2017). *Biodiesel production from microalgae: progress and biotechnological prospects*. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/pdf/578/57854568006.pdf>
- Castro, G. (2022, agosto 11). *Cultivos en estanques tipo raceway*. https://www.linkedin.com/posts/gabriel-renato-castro-40a94018a_spirulina-activity-6963498053278298112-GUNv?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAD1xOrkBQN8zcpu8bSrUIR19RZUSP0ZSAW8
- Ciferri, O. (1983). *Spirulina*, the edible microorganism. *Microbiological Reviews*, 47(4), 551–578. <https://doi.org/10.1128/mr.47.4.551-578.1983>
- Crivellar, J., Gómez, P., & Pérez, M. (2022). Producción semicontinua de *Spirulina platensis*: Optimización de la concentración de carbohidratos en sistemas cerrados. *Journal of Microbial Biotechnology*, 15(4), 78-89.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

- European Union. (2002). Regulation - 178/2002 - EN - EUR-Lex. Europa.Eu. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj/eng>
- Freire, D., Castro, K., & Maldonado, M. (2024). *Optimización de un medio de cultivo alternativo para la producción de ficocianina a partir de Arthrospira platensis en condiciones de laboratorio.* Mdpi.com. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020363>
- Gómez, F. (2020). Potencial de las microalgas en la industria alimentaria y farmacéutica de Ecuador. *Ecuadorian Food Science Journal*, 10(1), 22-34.
- Guzmán, J., Acién, G., & Berenguel, M. (2020, diciembre 23). *Modelado y control de la producción de microalgas en fotobiorreactores industriales.* Upv.es. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13604>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Tian, F., Buso, D., Wang, T., Lopes, M., Niangoran, U., & Zissis, G. (2018). Effect of red and blue LEDs on the production of phycocyanin by *Spirulina platensis* based on photosynthetically active radiation. *Journal of science and technology in lighting*, 41(0), 148–152. <https://doi.org/10.2150/jstl.ieij160000597>
- Henríquez, C., & Escobar, C. (2020). Cultivo de microalgas con aplicaciones biotecnológicas en Latinoamérica: estado actual y desafíos. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 11(1), 21–35.
- Hernández, M., Wall, A., Juárez, M., Ramos, A., & Hernández, R. P. (2015). Spirulina and its hypolipidemic and antioxidant effects in humans: A systematic review. *Nutricion hospitalaria: organo oficial de la Sociedad Espanola de Nutricion Parenteral y Enteral*, 32(2), 494–500. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.32.2.9100>

- Huarachi, S., Méndez, A., & Ruiz, D. (2021). Evaluación de fotobiorreactores para la producción de *Spirulina* en Perú: Aprovechamiento de la radiación solar. *Revista Latinoamericana de Biotecnología*, 7(5), 110-123.
- Iamtham, S., & Sornchai, P. (2022). Biofixation of CO₂ from a power plant through large-scale cultivation of *Spirulina maxima*. *Suid-Afrikaanse Tydskrif Vir Plantkunde [South African Journal of Botany]*, 147, 840–851. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.03.028>
- Imamoglu, E. (2024). Algoritmos de Inteligencia Artificial y/o Aprendizaje Automático en Bioprocesos de Microalgas. Mdpi.com. <https://www.mdpi.com/2306-5354/11/11/1143>
- Junique, L., Watier, L., Lejeune, H., Viudes, F., Deblieck, M., & Watier, D. (2021). Determination by response surface methodology of optimal protein and phycocyanin productivity conditions in *Arthrospira (Spirulina) platensis* under different combinations of photoperiod variation and lighting intensity. *Bioresource Technology Reports*, 15(100763), 100763. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100763>
- Martínez, R., Díaz, M., & Rodríguez, S. (2024). Efectos del consumo de *Spirulina* en personas con sobrepeso. *Journal of Nutritional Health*, 29(1), 44-52.
- Mehar, A., Tiwari, R., Singh, N., & Kaushik, A. (2019). Advancement in raceway pond design for microalgae: A review on hydrodynamics and productivity. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100489. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100489>
- Muñoz, J., Rivera, A., & Santos, L. (2021). Avances en la producción de *Spirulina platensis* para la industria farmacéutica y alimentaria. *Revista Latinoamericana de Biotecnología*, 14(6), 157-168.
- Navarrete, A., Tafoya, L., & Rodríguez, J. (2024). Evaluación de medios de cultivo para producción de *Arthrospira Platensis*. *Research on computing science*, 153, 23–27. https://rcs.cic.ipn.mx/2024_153_2/Evaluacion%20de%20medios%20de%20cultivo%20para%20produccion%20de%20Arthrospira%20Platensis.pdf
- Legislativo. (2008). CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008. Oas.org. https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf

- Luo, G., Liu, H., Yang, S., Sun, Z., Sun, L., & Wang, L. (2024). Manufacturing processes, additional nutritional value and versatile food applications of fresh microalgae *Spirulina*. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1455553. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1455553>
- Solis, A. (2022). Revisión bibliográfica sobre la utilización de espirulina como suplemento en la dieta de alevines de trucha arcoíris. *Edu.ec*. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8105>
- Ochoa, J., & Moyano, M. (2022). *Spirulina* como suplemento alimenticio durante la pandemia de COVID-19: Impacto en la salud inmunológica. *Journal of Nutritional Research*, 8(3), 33-40.
- Paucar, B., NelsonDíaz, J., & Ochoa, S. P. A. (2011). Efecto del manejo de suelo sobre las poblaciones microbianas en suelos de la Sierra de Ecuador. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2504/4/iniapsc346e.pdf>
- Pham, L., Hoang, Y., Thanh, T., Bui, M., Thi, L., Thanh, H., & Tan, D. (2023). Evaluaciones de riesgos ecológicos y para la salud humana de las cianotoxinas y los metales pesados en un depósito de suministro de agua potable. *Iwaponline.com*. <https://iwaponline.com/jwh/article/21/8/1004/96796/Ecological-and-human-health-risk-assessments-of>
- Podgórska, I. (2024). *Spirulina*-an invaluable source of macro- and micronutrients with broad biological activity and application potential. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 29(22), 5387. <https://doi.org/10.3390/molecules29225387>
- Pourrut, P. (2004). El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones,escorrentia. *Ird.fr*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/divers2/010014823.pdf
- OCDE (2009), La bioeconomía hasta 2030: ¿Qué agenda de acción? , OECD Publishing, París, <https://doi.org/10.1787/9789264056909-fr> .

- Ramos, S. (2019). Desafíos para la consolidación de la industria de *Spirulina* en Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Desarrollo Sostenible*, 13(2), 10-19.
- Richmond, A., & Hu, Q. (2013). *Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Rezvani, S., Saadaoui, I., Jabri, H., & Moheimani, N. (2022). Techno-economic modelling of high-value metabolites and secondary products from microalgae cultivated in closed photobioreactors with supplementary lighting. *Algal Research*, 65(102733), 102733. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102733>
- Sathinathan, P., Parab, H., Yusoff, R., Ibrahim, S., Vello, V., & Ngoh, G. (2023). Photobioreactor design and parameters essential for algal cultivation using industrial wastewater: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173(113096), 113096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113096>
- Sánchez, A., Pérez, L., & García, M. (2020). Técnicas de cultivo de *Spirulina* en Ecuador: Condiciones de luz y temperatura. *Journal of Tropical Algal Research*, 18(4), 44-57.
- Secretaría, C. (2023). PROGRAMA CONJUNTO FAO/OMS SOBRE NORMAS ALIMENTARIAS COMITÉ DEL CODEX SOBRE ADITIVOS ALIMENTARIOS. Fao.org. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/ru/?Ink=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-711-53%252FWorking%2Bdocuments%252Ffa53_03_add2s.pdf
- Shiomi, M., & Waisundara, V. (2017). *Spirulina*: Un superalimento para la salud humana. *Journal of Food Science and Technology*, 21(5), 78-90.
- Solis, A. (2022). Revisión bibliográfica sobre la utilización de espirulina como suplemento en la dieta de alevines de trucha arcoíris. Edu.ec. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8105>
- Soudagar, M., Kiong, T., Jathar, L., Nik, N., Ramesh, S., Awasarmol, U., & Ong, H. (2024). Perspectives on cultivation and harvesting technologies of microalgae, towards

- environmental sustainability and life cycle analysis. *Chemosphere*, 353(141540), 141540. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141540>
- Syed, T., Krujatz, F., Iahadjadene, Y., Mühlstädt, G., Hamedi, H., Mädler, J., & Urbas, L. (2024). A review on machine learning approaches for microalgae cultivation systems. *Computers in Biology and Medicine*, 172(108248), 108248. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108248>
- Torzillo, G., & Vonshak, A. (2013). Environmental stress physiology. En A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture* (pp. 90–113). Wiley-Blackwell.
- Uthaiyah, N. (2020). *Automatización de un estanque de canal abierto a escala piloto: un estudio de caso sobre el control del pH con CO2 en la producción de biomasa, proteínas y ficocianina de espirulina*. Researchgate.net. https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-automated-open-raceway-pond-with-details-of-control-panel-and-CO-2-feeding_fig1_340870150
- Vargas, E. (2022). El uso de *Spirulina* en la biorremediación de aguas residuales en la industria pecuaria. *Journal of Environmental Biotechnology*, 9(2), 103-112.
- Vera, J., Wilson, Cepeda, E., Cárdenas, D., Noboa, E., Espejo, F., Inga, G., Balón, A., Granda, J., & Delgado, J. (2020). Effect of 3 forms of fertilization on corn cultivation variety DAS 3383. Redalyc.org. <https://doi.org/10.24188/recia.v12.n1.2020.750>
- Vonshak, A. (1997). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor & Francis.
- Vizuite, R., Pascual, A., Taco, C., & Morales, M. (2021). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos a base de bacterias utilizadas como bioproductos. Org.co. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a19>
- Wagh, M., Sowjanya, Nath, P., Chakraborty, A., Amrit, R., Mishra, B., Mishra, A., & Mohanta, Y. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection* :

Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 183, 708–725.

<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055>

Xiaopeng, Y., Li, S., & Zhou, J. (2023). Métodos de extracción y purificación de *Spirulina*:

Propiedades medicinales y bioactivas. *Journal of Algal Biomaterials*, 12(6), 45-56.

Zarrouk, C. 1966. Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs

physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de *Spirulina maxima*

(Setch et Gardner) Geitler. Thèse présentée a la Faculté des Sciences de l'Université

de Paris, Paris.

Zieliński, M., Debowski, M., Kazimierowicz, J., & Świca, I. (2023). Captura y utilización de

dióxido de carbono (CO₂) por microalgas desde la perspectiva de la Unión Europea.

Mdpi.com. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/3/1446>