


Bibliometría de microalgas y cianobacterias como biofertilizantes

Bibliometrics of Microalgae and Cyanobacteria as Biofertilizers

Giovanny Alexander Gelvez Carvajal¹   William H. Suárez-Quintana¹  Andrés F. Barajas-Solano² 

¹ Grupo GIMBIO, Departamento de Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia

² Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

Resumen

Introducción: las microalgas han emergido como una opción sostenible y eficaz para la agricultura, especialmente en su uso como biofertilizantes. Gracias a sus propiedades adaptativas y su capacidad para absorber nutrientes de manera eficiente, pueden ser aprovechadas para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de las plantas.

Objetivo: analizar las investigaciones indexadas sobre microalgas y su utilización como biofertilizantes en la agricultura.

Materiales y Métodos: se realizó inicialmente una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, focalizada en artículos relacionados con el tema de estudio. Posteriormente, se aplicó la herramienta Bibliometrix para el análisis bibliométrico.

Resultados: se identificaron 200 artículos relevantes, siendo India el país con mayor producción de publicaciones en este ámbito. También se investiga la aplicación de microalgas en el tratamiento de aguas residuales, promoviendo así la sostenibilidad agrícola. Las cianobacterias fijadoras de nitrógeno, como Nostoc y Anabaena, mejoran la fertilidad del suelo y reducen la necesidad de fertilizantes sintéticos, mientras que microalgas como Chlorella vulgaris y Spirulina platensis mejoran la productividad, la resistencia al estrés y la salud del suelo.

Conclusiones: a pesar de su potencial, las investigaciones sobre el uso de microalgas como biofertilizantes aún están en etapas tempranas de desarrollo. Se evidencia un creciente interés científico en su aplicación agrícola, pero se requiere profundizar en estudios para consolidar su implementación sostenible a escala productiva.

Palabras clave: Agricultura, Bioestimulantes, Biofertilizantes, Cianobacterias, Microalgas.

Abstract

Introduction: Microalgae have emerged as a sustainable and effective option for agriculture, especially in their use as biofertilizers. Due to their adaptive properties and their capacity to efficiently absorb nutrients, they can be used to improve soil quality and promote plant growth.

Objective: To analyze indexed research on microalgae and their use as biofertilizers in agriculture.

Materials and Methods: A systematic search was initially conducted in the Scopus database, focused on articles related to the study topic. Subsequently, the Bibliometrix tool was applied for the bibliometric analysis.

Results: Two hundred relevant articles were identified, with India as the country with the highest production of publications in this field. The application of microalgae in wastewater treatment is also investigated, thereby promoting agricultural sustainability. Nitrogen-fixing cyanobacteria, such as Nostoc and Anabaena, improve soil fertility and reduce the need for synthetic fertilizers, while microalgae such as Chlorella vulgaris and Spirulina platensis improve productivity, stress resistance, and soil health.

Conclusions: Despite their potential, research on the use of microalgae as biofertilizers is still in early stages of development. There is an increasing scientific interest in their agricultural application, but further studies are required to consolidate their sustainable implementation at a productive scale.

Keywords: Agriculture, Biostimulants, Biofertilizers, Cyanobacteria, Microalgae.

¿Cómo citar?

Gelvez GA, Suárez-Quintana WH, Barajas-Solano AF. Bibliometría de microalgas y cianobacterias como biofertilizantes. Ingeniería y Competitividad, 2025, 27(3)e-30114884

<https://doi.org/10.25100/iyv.v27i3.14884>

Recibido: 14/05/25

Revisado: 06/06/25

Aceptado: 23/10/25

Online: 6/11/25

Correspondencia

wihersu@unipamplona.edu.co



¿Por qué se realizó este estudio?

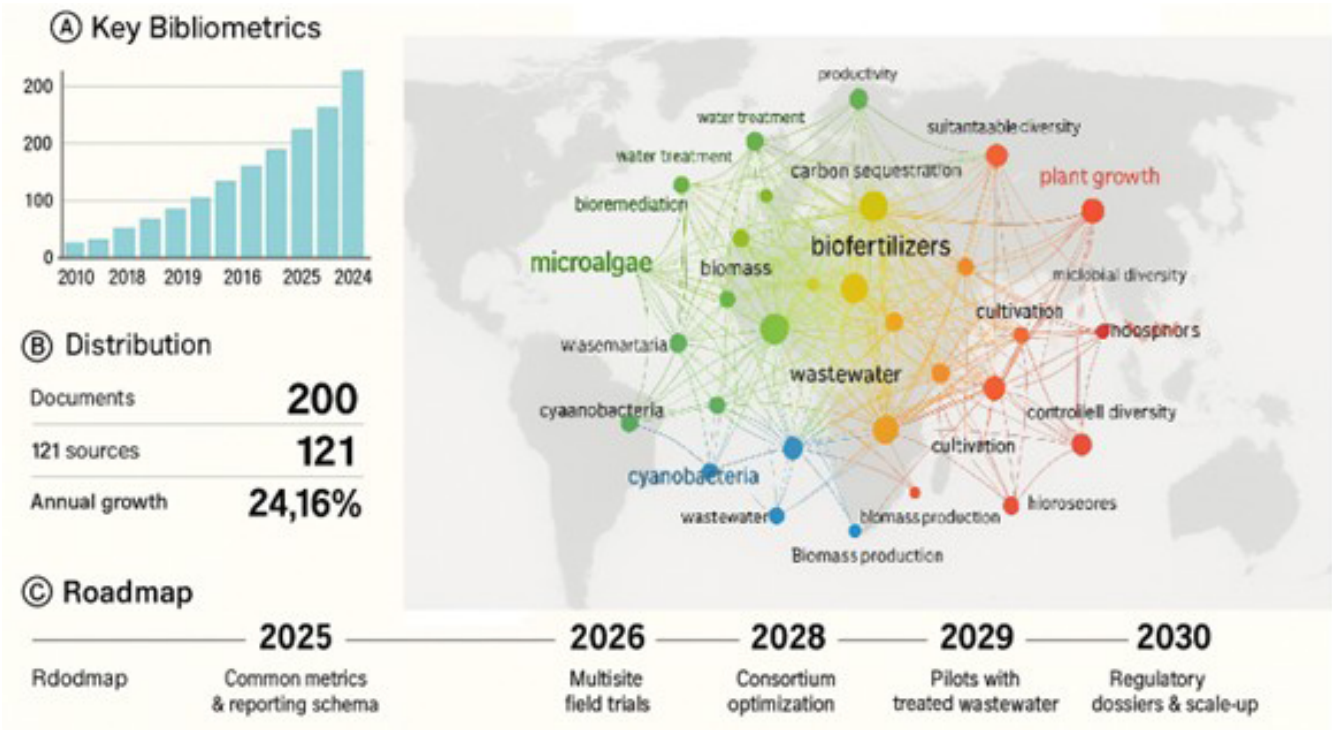
Este estudio aborda los costos ambientales de la fertilización convencional y la falta de una visión general centrada y basada en datos sobre las microalgas y las cianobacterias como biofertilizantes/bioestimulantes. Mapeamos el panorama global de la investigación en Scopus (2010-2024; fecha límite de datos: 31 de enero de 2025) utilizando Bibliometrix y VOSviewer (umbral ≥5 ocurrencias de palabras clave) para cuantificar la producción, los actores, los centros, los temas y la colaboración, e identificar tendencias, brechas y oportunidades alineadas con la sostenibilidad y la economía circular.

¿Cuáles fueron los hallazgos más relevantes?

La revisión mapea un campo en rápido crecimiento: 200 documentos (crecimiento anual del 24,16 %) de 121 fuentes, con un promedio de 41,16 citas por artículo, escritos por 939 investigadores (5,46 coautores/artículo) y un 20,5 % de colaboración internacional. La producción está liderada por India (seguida de España, Brasil, Italia, Egipto y Marruecos); Journal of Applied Phycology y Science of the Total Environment son los más prolíficos. Cinco temas predominan: fisiología vegetal/estrés abiótico y bioactivos; bioenergía/biorremediación/economía circular; biomasa/cultivo/bioquímica; aplicaciones agrobiotecnológicas; y fertilidad del suelo/reciclaje de nutrientes/aguas residuales. Las aplicaciones benefician consistentemente a los principales cultivos mediante la fijación de nitrógeno (Nostoc, Anabaena), fitohormonas y polisacáridos, administrados como biomasa, extractos, biocarbón, acondicionamiento de semillas o pulverizaciones foliares, con fuertes vínculos con la reutilización de aguas residuales y los modelos circulares. Las principales deficiencias incluyen la validación en campo, la estandarización, la ampliación (TEA/LCA) y las vías regulatorias, con una producción limitada en Latinoamérica más allá de Brasil.

¿Qué aportan estos hallazgos?

Un mapa cuantitativo completo de un campo multidisciplinario en rápido crecimiento que aclara quién publica, dónde, sobre qué cultivos/mecanismos, y con qué herramientas y espacios. Evidencia de que las microalgas/cianobacterias pueden mejorar los rendimientos, la tolerancia al estrés y la salud del suelo, a la vez que facilitan la recuperación de nutrientes y la integración de aguas residuales para modelos circulares. Orientación práctica: adecuar las especies y los modos de administración (p. ej., Nostoc/Anabaena para la fijación de nitrógeno; extractos de Chlorella/Spirulina para la bioestimulación) a los objetivos de los cultivos y las limitaciones en las explotaciones. Una agenda de investigación: estandarizar protocolos e informes, ampliar los ensayos a escala de campo, realizar análisis de transferencia de nutrientes (TEA) y análisis de ciclo de vida (LCA), desarrollar planes regulatorios para cepas modificadas y fortalecer las colaboraciones (especialmente en Latinoamérica).



Introducción

La agricultura desempeña un papel esencial en el crecimiento económico de las naciones, siendo clave para garantizar la seguridad alimentaria global. Para aumentar la producción agrícola, se han implementado prácticas modernas y diversos tipos de fertilizantes a gran escala. Sin embargo, el uso constante de fertilizantes químicos ha provocado daños ecológicos significativos, incluyendo la degradación del suelo, la contaminación del agua, la pérdida de biodiversidad y la suposición de riesgos para la salud humana y animal (1). Estos problemas se agravan por el rápido crecimiento demográfico global, que requiere un aumento sustancial en la producción de alimentos. En este contexto, las prácticas agrícolas convencionales que dependen de fertilizantes sintéticos y pesticidas están siendo cuestionadas por su impacto ambiental negativo. Estos métodos afectan a la sostenibilidad agraria a largo plazo y amenazan la seguridad alimentaria global. Ante estos desafíos, es imprescindible un cambio hacia prácticas agrícolas más sostenibles que aumenten la productividad de los cultivos y reduzcan significativamente el daño medioambiental (2).

A pesar de su enorme potencial, varios desafíos limitan la adopción generalizada de biofertilizantes y bioestimulantes derivados de microalgas (3). Las altas demandas de nutrientes y agua para el cultivo a gran escala representan barreras económicas y medioambientales. Además, los procesos intensivos en energía necesarios para la cosecha, extracción y purificación de compuestos bioactivos aumentan los costes de producción (4). Para superar estos obstáculos, es fundamental adoptar enfoques innovadores que mejoren la sostenibilidad y viabilidad económica de la producción de microalgas, como modelos de economía circular que integren su cultivo con el tratamiento de aguas residuales. La colaboración interdisciplinar es esencial para avanzar en este campo, uniando perspectivas biológicas, químicas, de ingeniería y económicas para desarrollar soluciones sostenibles y de amplio alcance (5).

El uso de fertilizantes químicos en la agricultura genera problemas significativos para la salud del suelo y el medio ambiente. En este contexto, los biofertilizantes y bioestimulantes derivados de microalgas se posicionan como alternativas sostenibles para mitigar estos efectos adversos (6). Varios estudios han investigado la aplicación de microalgas y cianobacterias en la agricultura, destacando su papel como biofertilizantes y bioestimulantes en cultivos como arroz, maíz, tomate, lechuga, cebolla, pepinos y otras hortalizas. Además, se ha evaluado su uso en el tratamiento de aguas residuales, promoviendo una agricultura más sostenible. La fijación de nitrógeno, especialmente a través de cianobacterias como *Nostoc muscorum* y *Anabaena*, ha mejorado la fertilidad del suelo, reducido la dependencia de fertilizantes químicos y optimizado el crecimiento de los cultivos (7). En biorremediación, también se ha demostrado que las microalgas y las cianobacterias son eficaces para recuperar nutrientes de aguas residuales, generando potencialmente bioproductos valiosos como biocombustibles y biofertilizantes (8). Los estudios sobre la sostenibilidad de estos biofertilizantes han demostrado su impacto positivo en el reciclaje de nutrientes y la mejora de la salud del suelo. Entre las microalgas más utilizadas se encuentran *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis*, *Scenedesmus* sp. y *Desmodesmus* sp., que se emplean en el tratamiento de aguas residuales y la mejora del rendimiento de los cultivos. Los cultivos de arroz, hortalizas, maíz y trigo, así como los sistemas hidropónicos, han sido objeto de investigaciones que demuestran los beneficios de las microalgas para mejorar la productividad, la resistencia al estrés y la calidad del suelo (9).

El análisis bibliométrico destaca como una herramienta fundamental para evaluar y comprender el conocimiento científico, ya que no solo permite cuantificar y visualizar la producción académica, sino también identificar tendencias emergentes y cartografiar redes colaborativas. Este enfoque integra la medición de la cantidad y calidad de las publicaciones, proporcionando una evaluación integral del impacto en el avance de la ciencia. En áreas emergentes, como los biofertilizantes basados en microalgas, su relevancia es aún mayor debido a la naturaleza interdisciplinar del campo. La metodología facilita la detección rápida de áreas bien exploradas frente a las poco estudiadas, lo cual es esencial para orientar futuras investigaciones y definir políticas científicas, al tiempo que revela sinergias entre disciplinas como la agronomía, la biotecnología, la ecología y la economía circular.

Metodología

Informe de progreso sobre el uso de microalgas como biofertilizantes

Para este estudio, se realizó una búsqueda inicial de información en la base de datos Scopus (<http://www.scopus.com>; Elsevier B.V, Ámsterdam, Países Bajos), se centró en identificar publicaciones sobre el uso de microalgas como biofertilizantes. Scopus ofrece herramientas avanzadas para el análisis de citas, redes de coautoría y evaluación de impacto mediante múltiples métricas, permitiendo estudios bibliométricos detallados y actualizados. Su capacidad para integrar datos cuantitativos y cualitativos facilita la identificación de tendencias emergentes e interrelaciones temáticas entre publicaciones, aspectos clave para orientar investigaciones futuras y definir políticas científicas. Scopus, reconocida como una de las plataformas científicas más completas y actualizadas a nivel mundial, proporcionó acceso a datos de vanguardia sobre aplicaciones de microalgas en la agricultura. Este enfoque metodológico facilitó la identificación de avances recientes y tendencias emergentes en el campo, proporcionando una base sólida para evaluar el potencial de las microalgas en la mejora de los procesos agrícolas.

Análisis bibliométrico del uso de microalgas como biofertilizante

Se realizó una búsqueda sistemática en la base de datos de SCOPUS, centrada en artículos publicados internacionalmente entre 2010 y 2024, finalizando la recogida de datos el 31 de enero de 2025. La estrategia de búsqueda implementada incluía los términos TÍTULO-ABS-KEY (microalgas O "microalgas" O cianobacterias) y (biofertilizante O "fertilizante natural" O biofertilizante O bioestimulante O bioestimulante) y (agricultura O agricultura O horticultura) Y ("crecimiento de cultivos" O "rendimiento de cultivos" O productividad O cultivo O mejora O sostenibilidad). El software VOSviewer (versión 1.6.19, Universidad de Leiden, Países Bajos) se utilizó para evaluar la frecuencia de palabras clave para el análisis bibliométrico. Se estableció un umbral mínimo de cinco ocurrencias para asegurar que los resultados fueran representativos y significativos.

Cada nodo en el análisis representa una palabra clave, cuyo tamaño refleja su frecuencia de ocurrencia, el color de su relación y clasificación, y los enlaces que indican la coocurrencia entre términos. La información se analizó después considerando las siguientes dimensiones: 1)

producción de documentos por año; 2) la prominencia de los autores; 3) instituciones participantes; 4) campos de estudio relevantes; y 5) distribución geográfica de las publicaciones.

VOSviewer es una herramienta avanzada para la construcción y visualización de mapas bibliométricos. Como describe Hamidah (10), este software permite la representación visual de distribuciones de revistas, autores, afiliaciones y los artículos más citados, junto con el análisis de la frecuencia de palabras clave y las relaciones encontradas mediante el motor de búsqueda. En el presente estudio, la combinación de VOSviewer y Bibliometrix es esencial en el análisis bibliométrico debido a su capacidad para integrar visualizaciones intuitivas y análisis estadísticos robustos. VOSviewer destaca en la creación de mapas que revelan relaciones en coautoría, co-citaciones y co-ocurrencia de palabras, facilitando la identificación de patrones, grupos temáticos y tendencias emergentes. Paralelamente, Bibliometrix, que opera en el entorno R, ofrece herramientas avanzadas para calcular índices clave y automatizar la extracción y limpieza de datos, asegurando un análisis cuantitativo preciso y la reproducibilidad de los resultados. En conjunto, ambas herramientas mejoran el rigor del estudio al abordar de forma integral tanto los aspectos cualitativos como cuantitativos, lo cual es esencial para orientar futuras políticas de investigación y académicas.

Un análisis exhaustivo de la bibliografía recopilada durante la búsqueda se centró en los artículos más citados de los últimos 15 años. Esta revisión bibliográfica sobre el uso de microalgas como biofertilizantes destaca su significativo potencial para mejorar la productividad agrícola de forma sostenible. Los resultados subrayan la creciente importancia de las microalgas para promover prácticas agrícolas más ecológicas y eficientes.

Estado del arte de las microalgas como biofertilizantes en Colombia

Teniendo en cuenta la limitada disponibilidad de estudios que vinculen microalgas como biofertilizantes, se realizó un análisis exhaustivo del estado del arte sobre su aplicación en la agricultura. El objetivo principal era evaluar el potencial de las microalgas como estrategia sostenible para mejorar la productividad agrícola y la calidad del suelo en el país.

Informe de progreso sobre el uso de microalgas como biofertilizantes

Análisis bibliométrico del uso de microalgas como biofertilizante

La Tabla 1 presenta las métricas relevantes sobre la producción académica e impacto (2010-2024). La tabla resume datos cuantitativos sobre fuentes y artículos, destacando elementos como el número de revistas y libros (121 fuentes), 200 artículos y una tasa de crecimiento anual del 24,16%, lo que sugiere una expansión dinámica en la producción científica. La sección de palabras clave destaca dos categorías: palabras clave amplificadas (1485 términos) y palabras clave del autor (586 términos), proporcionando una visión amplia del enfoque temático de la producción. En cuanto a la autoría, la imagen indica 939 autores implicados, con solo cinco artículos de un solo autor; Además, destaca la colaboración internacional, con un 20,5% de coautorías a nivel global y una media de 5,46 coautores por artículo, lo que requiere una red de investigación sólida y colaborativa.

Tabla 1. Resumen de los indicadores científicos de producción

Periodo	2010:2024
Fuentes (revistas, libros, etc.)	121
Documentos	200
Tasa de crecimiento anual (%)	24.16
Número medio de citas por documento	41.16
Referencias	15480
Contenido del documento	
Keywords Plus (ID)	1485
Palabras clave del autor (DE)	586
AUTORES	
Autores	939
Autores de documentos de un solo autor	5
Colaboración de autores	
Co-authors por papel	5.46
Coautorías internacionales	20.5

La Figura 1 muestra que durante los primeros años (2010, 2012 y 2013), el indicador se mantuvo en cero, salvo por un ligero aumento registrado en 2011 con tres artículos. Desde 2014 en adelante, los datos muestran comienzos modestos, con 1 artículo tanto en 2014 como en 2015. Entre 2016 y 2019, fue evidente un crecimiento progresivo: 7 artículos en 2016, 5 artículos en 2017, 9 artículos en 2018 y 10 artículos en 2019. A partir de 2020, la tendencia alcista se intensificó significativamente, alcanzando 15 artículos en 2020, 24 artículos en 2021, 30 en 2022, 45 en 2023 y culminando en 50 artículos en 2024. El aumento de publicaciones se debe a la convergencia de una creciente conciencia ambiental, que impulsa la búsqueda de alternativas sostenibles a los impactos de los fertilizantes químicos, con avances tecnológicos y metodológicos que mejoraron el cultivo y procesamiento de microalgas, permitiendo su integración en diversas aplicaciones agrícolas, y a un mayor apoyo financiero e institucional que, a través de políticas de promoción y colaboración interdisciplinar, ha impulsado proyectos sobre el uso de microalgas y cianobacterias como biofertilizantes.

La línea ascendente en la producción científica anual entre 2010 y 2024 sugiere un interés y desarrollo crecientes en diversas áreas de investigación directamente relacionadas con el uso de microalgas en la agricultura como insumos biológicos. Es plausible que esta tendencia al alza refleje el aumento de la investigación, publicaciones y proyectos tecnológicos que exploran el potencial de las microalgas para mejorar la calidad del suelo y promover una mayor sostenibilidad.

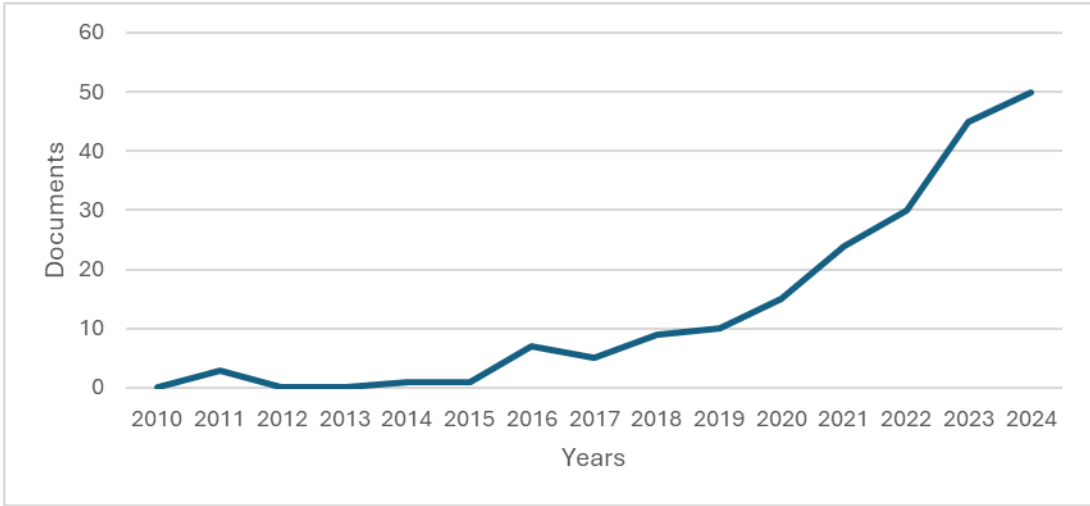


Figura 1. Evolución del número de publicaciones de 2010 a 2024

Los diferentes tipos de documentos presentados en la Figura 2 clasifican 112 artículos, dos libros, 30 capítulos de libros, cinco comunicaciones en congresos y 51 artículos de revisión, lo que indica diversidad en las formas de difusión del conocimiento y una clara tendencia a la publicación en revistas especializadas, además de un fuerte componente de revisiones sistemáticas. Los artículos de revisión analizan estudios previos sobre un tema, proporcionando una visión estructurada del conocimiento actual de forma rápida y accesible tanto para expertos como para principiantes. Como no requieren datos primarios, son menos costosos de producir y facilitan la identificación de avances y lagunas, guiando así la investigación futura y apoyando políticas científicas.

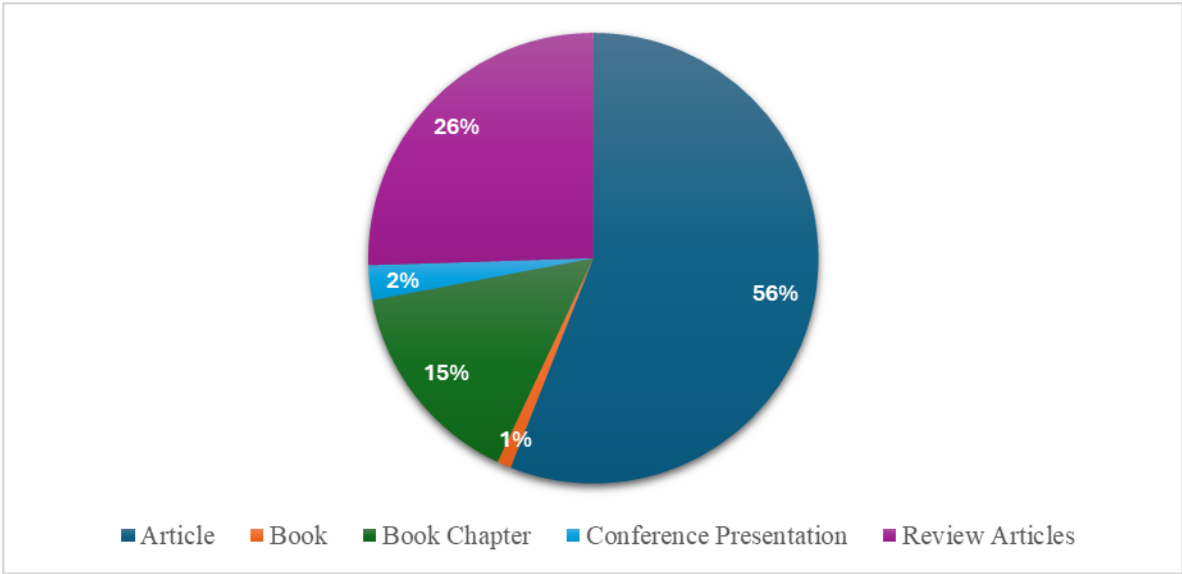


Figura 2. Distribución de diferentes tipos de documentos

Una vez identificado el país de origen de cada publicación, se utilizó el paquete RStudio bibliometrix para clasificarlas según su producción en el campo de la investigación de microalgas aplicadas como biofertilizantes y bioestimulantes. En la Figura 3A, India registró el mayor número de publicaciones, consistente con el mayor número total de citas. España, Brasil, Italia, Marruecos y Egipto la siguen. Cabe destacar que Brasil es el único país latinoamericano que obtiene

una puntuación alta en este análisis, lo que indica su posición como actor clave y líder en la investigación científica de la región, contribuyendo significativamente a la producción e influencia de la investigación latinoamericana. Además, la presencia de varios países europeos en los puestos más altos pone de relieve la sólida tradición de excelencia en investigación del continente, ya que tienden a liderar en diversos campos científicos y fomentar la colaboración transfronteriza, reforzando así su autoridad e impacto.

La Figura 3B presenta un gráfico de barras horizontal que diferencia las publicaciones asignadas a un solo país (SCP) de aquellas de colaboraciones multinacionales (MCP). Cada barra está segmentada en dos colores, distinguiendo visualmente entre investigaciones nacionales e internacionales. Esta representación es prueba de la notable actividad investigadora de India en comparación con otros países, al tiempo que destaca dinámicas de colaboración tanto nacionales como globales. En términos concretos, India, España, Brasil, Italia, Egipto y Marruecos lideran las publicaciones SCP, mientras que India, España, Brasil y Egipto lideran las colaboraciones MCP. En general, esta visualización facilita una comparación rápida del desempeño de cada país en la elaboración de artículos de investigación, subrayando la importancia de la cooperación en la generación de conocimiento científico.

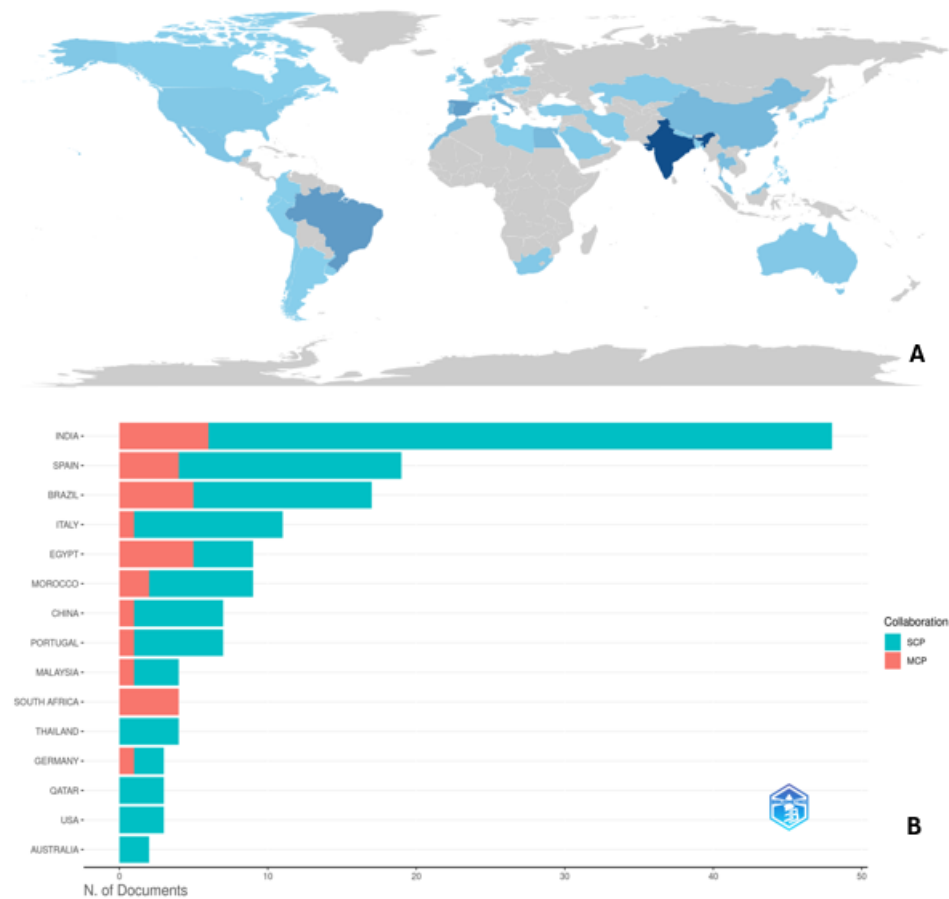


Figura 3. Un. La mayoría de los países productivos en microalgas se aplican como biofertilizantes y bioestimulantes. B. Producción por país (SCP: publicaciones de un solo país, MCP: publicaciones multipaís).

La tabla 2 muestra los 5 clústeres establecidos en el análisis. El primer grupo (rojo) se centra en aspectos bioquímicos y fisiológicos (como la respuesta al estrés abiótico, el efecto de antioxidantes y reguladores del crecimiento) relacionados con la mejora del rendimiento y el desarrollo de los cultivos. El segundo grupo (verde) muestra temas relacionados con la conversión de biomasa en bioenergía y biocombustibles, haciendo hincapié en técnicas de digestión anaeróbica, biorremediación y estrategias para la economía circular. Estos aspectos destacan las dimensiones medioambientales y energéticas de la investigación. El tercer grupo (azul) está orientado a estudios comparativos de producción de biomasa, composición bioquímica (pigmentos, proteínas, lípidos) y parámetros de cultivo, que permiten evaluar alternativas a los fertilizantes convencionales. El cuarto

clúster (amarillo) integra la investigación sobre tecnologías y procesos que combinan biotecnología con innovación en agricultura (por ejemplo, robots agrícolas y biofertilizantes), centrándose en la productividad, la sostenibilidad ambiental y la reducción del impacto de los insumos químicos. El quinto clúster (morado) aborda estudios centrados en aplicaciones prácticas, como la mejora de la fertilidad del suelo, el reciclaje de nutrientes y la gestión de aguas residuales, conectándose directamente con la agricultura sostenible y las prácticas de gestión de recursos. En resumen, los Clústeres 1, 4 y 5 forman una cadena lógica de desarrollo: el Clúster 1 sienta las bases bioquímicas y fisiológicas para comprender el potencial de las microalgas y las cianobacterias; El Clúster 4 utiliza este conocimiento para generar innovaciones tecnológicas y biotecnológicas, facilitando la formulación y aplicación de biofertilizantes; y el Clúster 5 traduce estas innovaciones en aplicaciones prácticas, mejorando la fertilidad del suelo, promoviendo el reciclaje de nutrientes y asegurando la gestión sostenible de los recursos agrícolas.

Tabla 2. Agrupaciones de microalgas como biofertilizantes

Clúster 1
estrés abiótico, agricultura, agricultura alternativa, antioxidantes, antioxidantes, <i>Anthrospira platensis</i> , bacterias, compuestos bioactivos, biofertilizantes, bioestimulantes, química, cultivos, producción agrícola, rendimiento agrícola, cianobacterias, cianobacterias, fertilizantes, seguridad alimentaria, hongos, germinación, tasa de crecimiento, crecimiento, desarrollo, humanos, hierro, metabolismo, comunidad microbiana, microbiología, micorrizas, absorción de nutrientes, agricultura ecológica, fertilizante orgánico, fosfatos, fitohormona, planta, desarrollo vegetal, extracto vegetal, extractos vegetales, hoja de planta, plantas, potasio, procedimientos, rizosfera, semilla, suelo, fertilidad del suelo, espirulina sostenible, sostenibilidad, agricultura sostenible, desarrollo sostenible, toxicidad
Clúster 2
residuos agrícolas, biomasa de algas, digestión anaerobia, biocombustibles, biocombustibles, biogás, biorrefinería, biorremediación, dióxido de carbono, secuestación de carbono, economía circular, cambio climático, digestión, ecología, aspecto económico, gases, gases, gases de efecto invernadero, microalgas, microalgas, microalgas, cultivo de microalgas, biomasa microalgal, recuperación de nutrientes, fotobioreactor, ficorremediación, eliminación de contaminantes, recuperación, revisión, fármaco no clasificado, gestión de aguas residuales, aguas residuales, Tratamiento de aguas residuales, gestión del agua, purificación de agua
Clúster 3
Artículo, biodiésel, producción de biomasa, carbohidratos, carotenoides, demanda química de oxígeno, Chlorella, clorofila, clorofila a, contenido de clorofila, estudio comparativo, estudio controlado, peso seco, conductividad eléctrica, peso fresco, fertilizantes inorgánicos, lechuga, lípidos, biomasa microbiana, no humana, nutriente, ph, crecimiento vegetal, proteína, <i>Scenedesmus</i> , longitud de brotes, cultivo específico, desarrollo sostenible, valoración
Clúster 4
robots agrícolas, algas, amoníaco, bacterias, biofertilizantes, biofertilizantes, biodiversidad, biofertilizantes, biotecnología, fertilizantes químicos, cultivos, eco-respetuosos, impacto ambiental, protección ambiental, sostenibilidad ambiental, actividad enzimática, fertilizantes, algas verdes, cosecha, metabolitos, fertilizantes nitrogenados, fijación de nitrógeno, fotosíntesis, productividad, suelos, desarrollo sostenible, contaminación del agua
Clúster 5
tierras agrícolas, crecimiento de algas, biomasa, carbono, huella de carbono, <i>concentración (parámetro de Chlorella vulgaris)</i> , efluente, efluentes, estudio experimental, aplicación de fertilizantes, agua dulce, maíz, microorganismos, nitrógeno, disponibilidad de nutrientes, ciclo de nutrientes, nutrientes, fósforo, prioridad Diario, reciclaje, arroz, nutrientes del suelo, aguas residuales, agua, trigo

La Figura 5A (treemap) muestra los conceptos predominantes en publicaciones científicas relacionados con el uso de microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes. De las 1485 entradas recopiladas que cubren tanto palabras clave proporcionadas por el autor como indexadas, aparecieron 127 términos con una frecuencia de al menos cinco ocasiones. Los términos con

mayor incidencia se destacan a continuación: 'biomasa' (n=123), seguido de 'microalgas' (n=86), 'microalgas' (n=61), 'agricultura' (n=58), 'cultivo' (n=52), 'fertilizantes' (n=45), 'nitrógeno' (n=44), 'cianobacteria' (n=43), 'fertilizante' (n=43) y 'aguas residuales' (n=42). Esta visualización de palabras tipo nube (Figura 5B) facilita la rápida identificación de los temas predominantes en el área de estudio, permitiéndonos comprender el enfoque e intereses de la investigación. También destaca la interrelación entre estos conceptos, enmarcados en el contexto de la sostenibilidad y la optimización de procesos agrícolas mediante soluciones innovadoras basadas en microalgas.

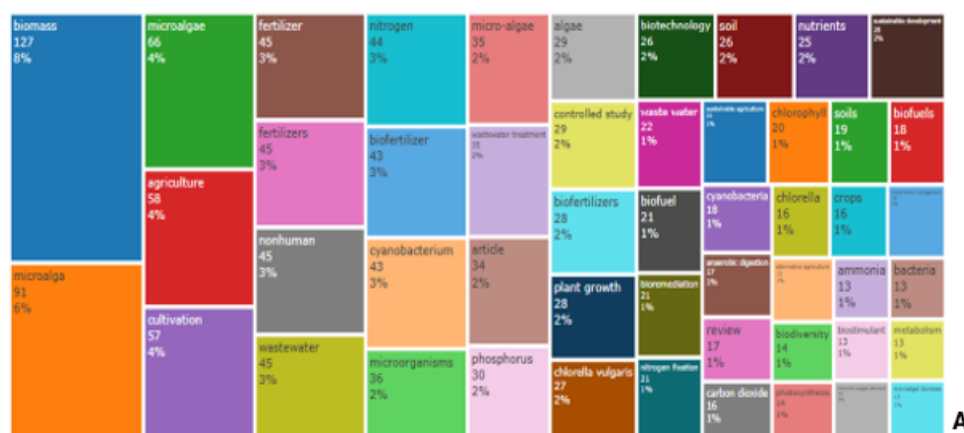


Figura 5. Análisis de palabras clave sobre el uso de microalgas en biofertilizantes y bioestimulantes: mapa de árbol 5A y visualización de nubes de palabras 5B

La Tabla 3 muestra información sobre las publicaciones académicas más relevantes sobre el uso de microalgas como biofertilizantes o bioestimulantes, destacando las más citadas. Se incluyen campos como autor(es), título, año de publicación, DOI y número de citas, lo que permite identificar tendencias de investigación y el impacto de cada estudio; Hay evidencia de un creciente interés en el tema entre 2016 y 2018, lo que pone de manifiesto la importancia de estos estudios

para la comprensión y mejora de la productividad agrícola mediante prácticas sostenibles.

Tabla 3. Autores más relevantes

Título	Año	Número de citas	DOI	Autor
Propiedades biofertilizantes y bioestimulantes del microalga <i>Acutodesmus dimorphus</i>	2016	299	10.1007/s10811-015-0625-2	(11)
El uso de microalgas como fertilizante orgánico de alta valor y liberación lenta da lugar a tomates con niveles elevados de carotenoides y azúcar	2016	254	10.1007/s10811-015-0775-2	(12)
Microalgas como biofertilizantes para el crecimiento del arroz y la productividad del rendimiento de semillas	2018	172	10.1007/s12649-017-9873-5	(13)
Explorando la eficacia de la biomasa microalgal cultivada en aguas residuales como biofertilizante para el trigo	2016	169	10.1007/s11356-015-5884-6	(14)
<i>Exopolisacáridos de Dunaliella</i> salina: un bioestimulante prometedor para la tolerancia al estrés salino en el tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	2018	151	10.1007/s10811-017-1382-1	(15)

La Figura 6 presenta un gráfico de barras que ilustra el desempeño de diversas universidades e institutos de investigación, evaluado en función de sus publicaciones. Este gráfico destaca las diez principales instituciones con más de 183 publicaciones. De estos, tres son de instituciones indias, dos de España y uno de Tailandia, Sudáfrica, Catar, Marruecos y Egipto. Los aspectos analizados incluyen el número de publicaciones anuales, la distribución de las publicaciones por institución y país, y el análisis de fuentes y palabras clave. Esta representación visual facilita la identificación de las principales entidades académicas y de investigación, permitiendo una comparación rápida de sus contribuciones al campo.

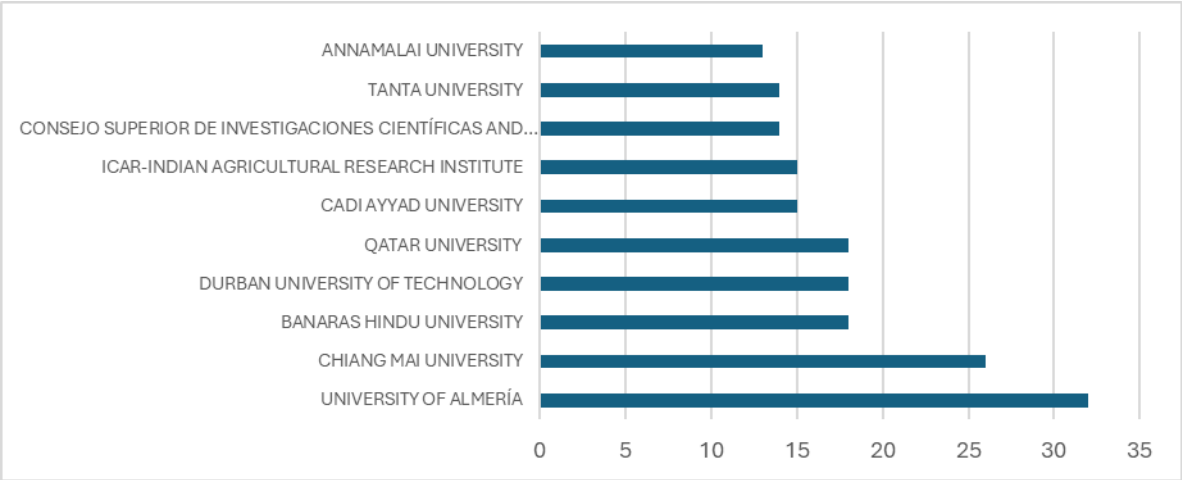


Figura 6. Instituciones líderes por número de publicaciones científicas sobre microalgas como biofertilizante o bioestimulante

La Figura 7 presenta la mayor cantidad de publicaciones en las 10 principales revistas y campos de investigación. Entre las revistas evaluadas, la Journal of Applied Phycology y Science of the

Total Environment destacan por tener 13 y 11 publicaciones, respectivamente, lo que sugiere que tienen un alto impacto y relevancia en el tema tratado. En un rango intermedio se encuentran Tecnología de Biorecursos (7 publicaciones), *Investigación de Algas* (6 publicaciones), *Agronomía* (5 publicaciones), *Journal of Environmental Management* (5 publicaciones) y *Plantas* (4 publicaciones). Además, revistas como *Biomass Conversion and Biorefinery* (3 publicaciones), *Biotechnology Advances* (3 publicaciones) y *Frontiers in Plant Science* (3 publicaciones) ocupan posiciones intermedias, lo que demuestra la diversidad en el rendimiento y la relevancia de estas fuentes dentro del campo de estudio.

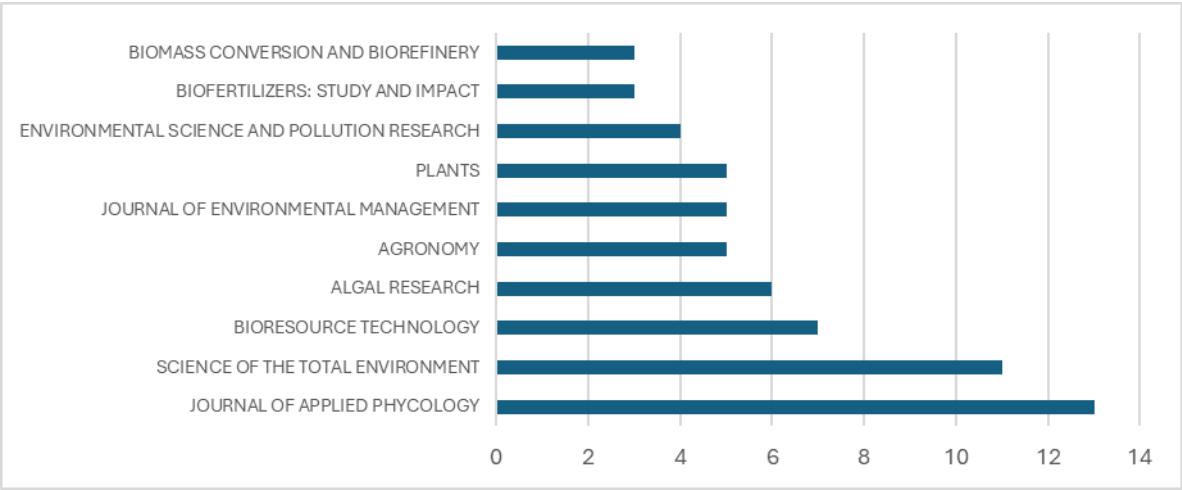


Figura 7. Revistas con la mayor producción científica

Existen un total de 21 áreas de estudio que siguen el desarrollo de la investigación sobre microalgas y cianobacterias como biofertilizantes y bioestimulantes desde 2010 hasta 2024, destacando una evolución multidisciplinar orientada a mejorar la productividad agrícola, la sostenibilidad ambiental y la valoración de subproductos. Este enfoque integrado se refleja en la diversidad de áreas temáticas representadas en la Figura 8, donde “Ciencias agrícolas y biológicas” (26,5%) y “Ciencias medioambientales” (21,5%) son las más destacadas. Estas categorías predominantes subrayan el fuerte interés por aplicaciones prácticas en la agricultura y la gestión medioambiental. Al mismo tiempo, otras disciplinas como “Energía”, “Bioquímica, Genética y Biología Molecular”, “Ingeniería Química” e “Ingeniería” contribuyen desde perspectivas técnicas y moleculares complementarias, mostrando cómo la investigación se ha enriquecido con enfoques interdisciplinarios para abordar problemas de biofertilización, bioestimulación, tratamiento de aguas residuales y fitorremediación.

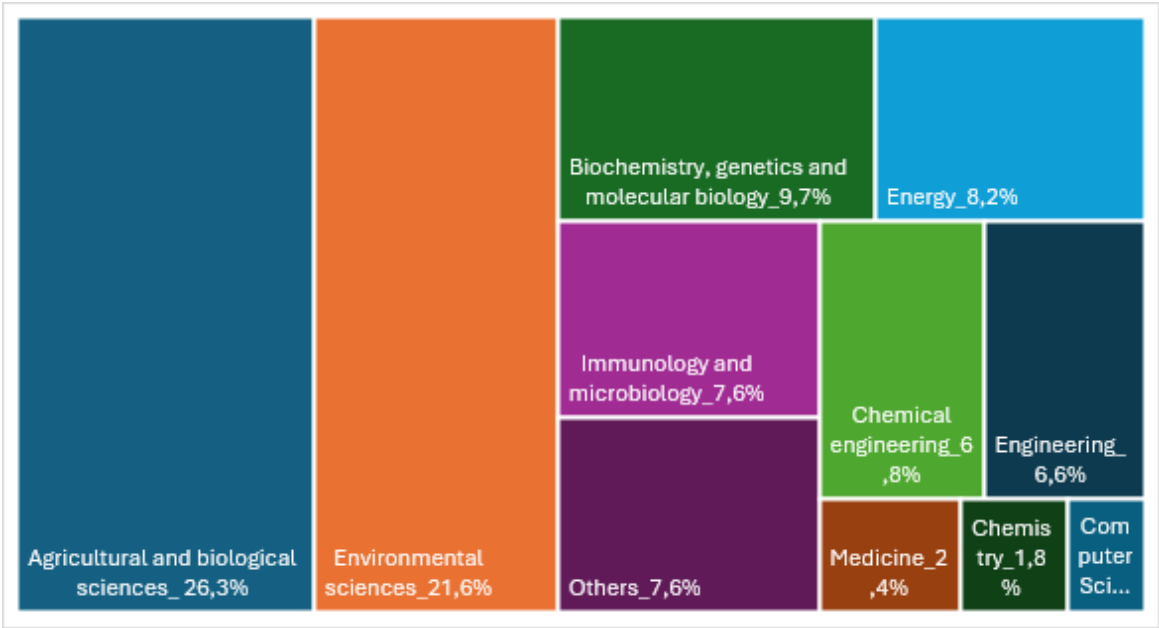


Figura 8. Documentos por área de estudio

Revisión bibliográfica sobre el uso de microalgas como biofertilizantes

Las microalgas y las cianobacterias, microorganismos fotosintéticos con notable versatilidad metabólica, han surgido como opciones prometedoras para abordar esta necesidad crítica. Su capacidad para actuar como biofertilizantes y bioestimulantes eficaces, ofreciendo una alternativa natural y respetuosa con el medio ambiente a los insumos sintéticos, es el foco central de esta revisión. Las microalgas y las cianobacterias abarcan muchos organismos fotosintéticos que habitan ambientes acuáticos y terrestres. Las cianobacterias, o algas azul-verdosas, son organismos procariotas, mientras que las microalgas son eucariotas, lo que genera una diversidad biológica que genera una amplia gama de capacidades metabólicas y compuestos bioactivos. Esta diversidad los convierte en candidatos ideales para aplicaciones agrícolas sostenibles, ya que su eficiencia fotosintética y su capacidad para utilizar diversas fuentes de nutrientes los hacen atractivos para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos (16). Ejemplos bien documentados de microalgas, como *Chlorella vulgaris*, *Spirulina platensis*, *Acutodesmus dimorphus* y *Scenedesmus* sp., han beneficiado significativamente a la agricultura (17). Además, las cianobacterias como *Anabaena* y *Nostoc* son conocidas por su capacidad para fijar nitrógeno, mejorando la fertilidad del suelo (18).

Los efectos beneficiosos de las microalgas y las cianobacterias en el crecimiento de los cultivos se deben a los compuestos bioactivos que producen, los cuales actúan a través de diversos mecanismos, influyendo en aspectos clave de la fisiología vegetal. Las fitohormonas, como auxinas, citoquininas, giberelinas y ácido abscísico, regulan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las microalgas producen estas hormonas, favoreciendo la elongación del tallo, la floración y la formación de frutos (19). Además, los polisacáridos generados por estas microalgas mejoran la estructura del suelo, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes. Micronutrientes como hierro, zinc y manganeso contribuyen al bienestar general de las plantas, mientras que enzimas como las fosfatasas y los solubilizadores de potasio aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo (3).

Algunas especies también producen compuestos que activan mecanismos de defensa de las plantas, mejorando su resistencia a estrés bióticos y abióticos. La aplicación de microalgas y cianobacterias en la agricultura es muy versátil. Se han explorado diversas técnicas de aplicación, cada una con ventajas y desventajas. Por ejemplo, la preparación de semillas remojándolas en extractos de microalgas antes de plantar mejora las tasas de germinación y el vigor de las plántulas. Los sprays foliares proporcionan una entrega rápida de compuestos bioactivos a las plantas, mejorando la eficiencia fotosintética y abordando las deficiencias nutricionales (20). Las enmiendas del suelo, por su parte, incorporan biomasa o extractos de microalgas, proporcionando una fuente duradera de nutrientes y mejorando la salud del suelo y la actividad microbiana beneficiosa. En el cultivo de tomates, varias especies han mostrado un potencial considerable. Por ejemplo, *Ulothrix klebsormidium* mejoró la longitud de las hojas y la biomasa, así como el contenido de nitrógeno y fósforo cuando se aplica como biomasa seca (21), mientras que *Acutodesmus dimorphus* incrementó la longitud de los brotes y los brotes cuando se usa tanto como extracto líquido como biomasa seca (11). Además, *Asterarcys quadricellulare*, mediante pulverizaciones foliares, estimuló la zona foliar y la producción de frutos, aumentando el contenido de azúcar y aminoácidos (22). Además, el extracto de polisacáridos obtenido de *A. platensis*, *D. salina* y *Porphyridium* sp. ha mostrado un aumento del crecimiento vegetal que incrementa el número de ganglios, carotenoides, clorofila, proteínas y nitrato reductasa (23). En cultivos cerealices como trigo, cebada, arroz y maíz, las respuestas fueron igualmente significativas. *D. salina* mejoró la germinación del trigo, la longitud del brote y la tolerancia a la sal (24), y combinaciones como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis* y *Nannochloropsis* sp., aumentaron la altura de las plantas y el número de hojas (14). *C. vulgaris*, en combinación con *Microcystis* sp., mejoró la disponibilidad de fósforo en el suelo (25) y *Anabaena cylindrica* aumentó el contenido de clorofila y nitrógeno en las partes aéreas del trigo (26). En la cebada, *A. platensis* aumentó la longitud de la mazorca, el rendimiento de grano y el índice de cosecha (27). Para el arroz, las aplicaciones de *C. vulgaris* y *A. platensis* (13), *Scenedesmus dimorphus* (28) y una mezcla de tres especies de *Chlamydomonas*, *Chlorella* y *Desmodesmus* sp., (29) mejoraron consistentemente la longitud de los brotes y raíces, el peso seco, la absorción de nutrientes y el recuento de semillas. *A. platensis*, aplicada como biocarbón, aumentó el peso de semillas y la superficie de grano en el arroz (30). *Scenedesmus* sp., por sí solo, aumentó la disponibilidad de NPK en el suelo (31), y una mezcla de *Chlorella*/ *Scenedesmus* impulsó la germinación en trigo y berro (32). Incluso *Tetrademus obliquus* aumentó significativamente la germinación y el cultivo del trigo (33). El maíz también respondió bien a *C. vulgaris* y *A. platensis* mediante una mayor germinación, rendimiento y crecimiento de brotes (34), mientras que una mezcla que incluía *Neochloris conjuncta* y *Botryococcus braunii* aumentó el peso seco de las plantas usando líquido efluente (35). Un consorcio de microalgas mejoró aún más el peso seco de los brotes del maíz (36), y *Kappaphycus alvarezii* incrementó la producción de pigmento, la biomasa fresca y los niveles de metabolitos (37). Estos datos confirman que los cereales se benefician no solo de un mayor crecimiento, sino también de una mejora de los rasgos fisiológicos y el uso de nutrientes cuando se tratan con microalgas en diversas formas. Las verduras de hoja, legumbres y cultivos especiales también mostraron mejoras significativas. *C. vulgaris* y *C. pyrenoidosa* mejoraron la germinación y la tolerancia a la salinidad en lechuga, arroz, berenjena y pepino (38), mientras que *A. platensis* mejoró el crecimiento de plántulas y aumentó los niveles de poliaminas en la lechuga (39). En remolachas, los extractos líquidos de

C. vulgaris y *S. quadricauda* activan genes y rasgos radicales, mejorando la adquisición de nutrientes y promoviendo un crecimiento significativo de las plantas (40). Las aplicaciones de *C. vulgaris* mejoraron el peso seco y la longitud de las raíces (41), y en combinación con *S. obliquus*, mejoraron tanto el rendimiento de materia fresca como la germinación (42). Una tríada de *C. vulgaris*, *S. obliquus* y *Haematococcus pluvialis* provocó aumentos en la altura, longitud de las raíces, biomasa y contenido antioxidante en la lechuga (43). En apio y lechuga, una mezcla de *Anabaena oryzae*, *Nostoc muscorum* y *A. platensis* mejoró la altura, el desarrollo radicular y el contenido de nutrientes (44). En las judías, *Chlorella* sp., *C. vulgaris*, *Nannochloropsis salina* y *A. platensis* aumentaron el crecimiento, el rendimiento y la capacidad antioxidante (45), mientras que *C. vulgaris* por sí sola aumentó la altura, biomasa, recuento de semillas y nodulación (46). En el caso del pepino, *S. quadricauda* y *Anabaena circinalis* aumentaron la altura, el diámetro del tallo y la formación de los brotes (47). En la cebolla, *C. vulgaris* y *A. platensis* mejoraron los niveles de nitrógeno y el contenido de aminoácidos (48), y *S. subspicatus* incrementó la calidad del bulbo y la masa seca (49). Se observaron efectos adicionales en la albahaca, donde *C. vulgaris* aumentó la superficie foliar y la absorción de nutrientes (50); en espinacas y maíz bebé, donde *C. minutissima* promovió el crecimiento y la fertilidad del suelo (51); y en la quinoa, donde *C. pyrenoidosa* mejoró todos los principales parámetros vegetativos y el contenido de NPK en el suelo (52). En fresas, *C. fusca* elevó el contenido de clorofila por área foliar (53), y en lechuga, tomate y pepino, *Euglena gracilis* mejoró el vigor de las plántulas y la formación de raíces (54). *Chlorococcum* sp., aplicado a judías, tomate, pepino y pimiento, mejoró la longitud y el recuento de raíces (55), mientras que en el raigro, *Chlorella* y *Scenedesmus* sp., mejoró la biomasa de brotes y raíces y aumentó la diversidad microbiana rizosférica (56). En conjunto, estos estudios confirman que la incorporación de microalgas y cianobacterias en forma de biomasa seca, extractos líquidos, nanoencapsulaciones y pulverizaciones foliares generalmente tiene efectos positivos en el rendimiento del cultivo. En cereales, hortalizas, legumbres y cultivos especiales, estos organismos mejoran características relacionadas con el crecimiento, incluyendo la altura, la biomasa y los niveles de clorofila, así como rasgos fisiológicos y bioquímicos como el estado antioxidante, la acumulación de nutrientes y el sabor. La evidencia es convincente para el uso de microalgas y cianobacterias como bioestimulantes sostenibles y multiusos para disminuir la fertilización sintética y mejorar tanto la productividad como la calidad en una variedad de sistemas agrícolas. El diagrama de Sankey (figura 9) resume los principales tipos de cultivos, las divisiones de microalgas o cianobacterias y sus principales efectos.

Los consorcios de microalgas son comunidades dinámicas caracterizadas por interacciones simbióticas, tanto cooperativas como competitivas, que potencian sus capacidades metabólicas, bioquímicas y ecológicas (57). En estos consorcios, algunas especies maximizan la fotosíntesis y la fijación de CO₂, mientras que otras aportan metabolitos secundarios (como antioxidantes, polifenoles y aminoácidos) que protegen el conjunto contra el estrés oxidativo y patógenos (58). El intercambio de nutrientes es fundamental, ya que ciertas cepas liberan sustancias orgánicas que actúan como sustrato o señal, estimulando el crecimiento y la actividad de otras microalgas, lo que favorece la estabilidad y eficiencia del sistema (59). Además, la comunicación entre especies, mediada por moléculas de señalización en un mecanismo similar al quórum, regula la densidad celular y coordina respuestas adaptativas a condiciones adversas, incluso induciendo la producción de compuestos defensivos en algunas especies (60). La sinergia resultante y la diversidad

metabólica superan la suma de las capacidades individuales, proporcionando mayor eficiencia fotosintética, resiliencia a los cambios ambientales y tolerancia a los factores de estrés, aunque se mantienen relaciones competitivas que evitan la monopolización de los recursos y promueven la heterogeneidad del consorcio (61).

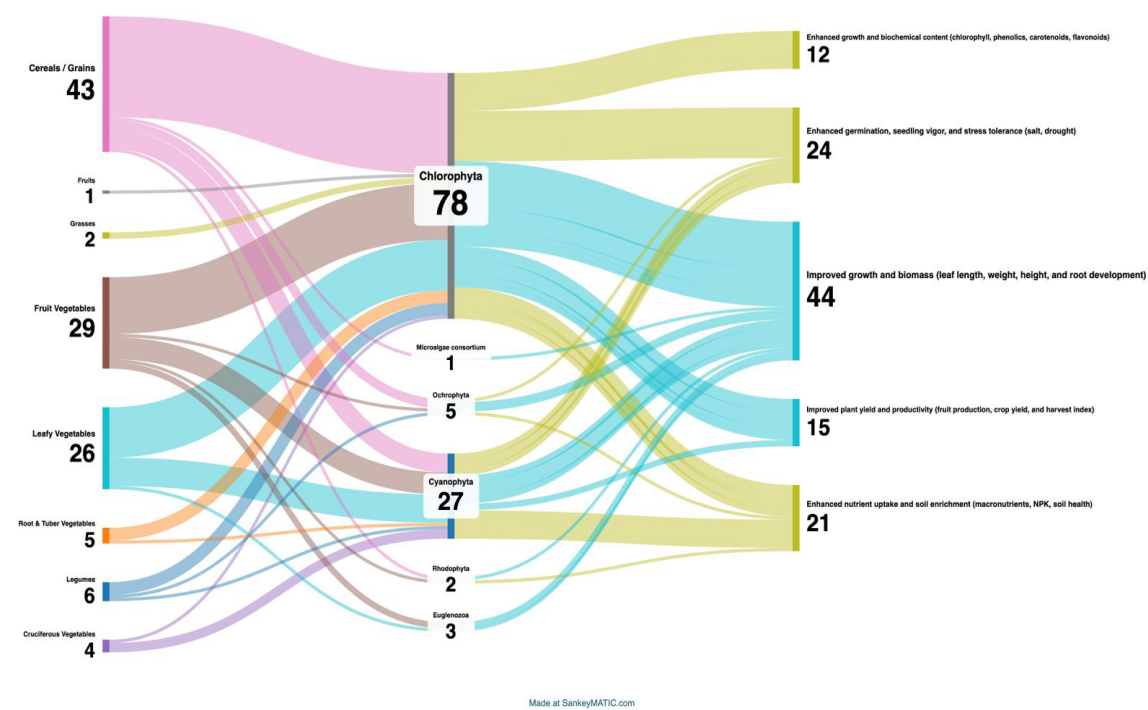


Figura 9. Diagrama de Sankey de cultivos, microalgas o cepas cianobacterianas y sus principales efectos en la producción agrícola.

En Colombia, un país con una gran diversidad de zonas agroecológicas, es esencial explorar alternativas sostenibles para su sector agrícola. Colombia enfrenta desafíos significativos para garantizar la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental, principalmente debido a prácticas agrícolas convencionales que pueden comprometer la integridad de sus ecosistemas y el bienestar de sus agricultores (62). Por lo tanto, es crucial la transición hacia prácticas agrícolas más sostenibles que garanticen la seguridad alimentaria y la protección ambiental en Colombia (63). En el contexto colombiano, la Tabla 4 resume los estudios realizados en el país sobre el uso de microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes. Estos estudios, que muestran el creciente interés en explorar alternativas sostenibles y biotecnológicas para la agricultura, ponen de manifiesto la diversidad de enfoques metodológicos aplicados. Se recomienda un análisis comparativo de estos estudios para identificar patrones, limitaciones y oportunidades para futuras investigaciones en esta área emergente.

Tabla 4. Artículos relevantes sobre el uso de microalgas como biofertilizantes en Colombia

Cosecha	Microalgas/cianobacterias	Efectos	Forma de solicitud	Autor
Trigo	<i>Chlorella sorokiniana</i>	Aumento de la longitud de la planta y mejora de la biomasa total	Extracto líquido	(64)
Gulupa	<i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Synechococcus rubescens</i> , <i>Cyanobium gracile</i>	La aplicación del consorcio de cianobacterias y el fertilizante orgánico aumentaron la longitud de las plantas.	Extracto líquido	(65)
Stevia y berenjena	<i>Limnospira maxima</i>	Mayor superficie foliar y altura de las plantas en ambos cultivos	Extracto líquido	(66)

Resultados y discusión

Los estudios iniciales realizados en 2011 se centraron en tres ejes principales: primero, se evaluaron los efectos tóxicos del carbarilo sobre la cianobacteria *Calothrix brevisima* , utilizada como biofertilizante en el cultivo de arroz, sometiéndola a diversas concentraciones durante 21 días (67); en segundo lugar, se analizó el potencial de las cianobacterias en áreas tan diversas como alimentos, agricultura, tratamiento de aguas residuales y producción de biocombustibles. con especial énfasis en la generación de metabolitos secundarios con valor terapéutico (68); y en tercer lugar, se destacó la relevancia de las comunidades microbianas, principalmente de la PGPR de “Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal” y las cianobacterias para mejorar la estabilidad, productividad y sostenibilidad de los agroecosistemas (69). Posteriormente, en 2014, un artículo de revisión evidenció que los biofertilizantes basados en PGPR, micorrizas y cianobacterias optimizan la absorción de nutrientes, promueven el crecimiento y activan genes clave en las defensas naturales de las plantas, abriendo así la vía hacia una agricultura más sostenible (70). Al año siguiente, en 2015, Choudhary y Dhar abordaron técnicas moleculares y genéticas que mejoran la biodisponibilidad de nutrientes, contribuyendo al incremento de la sostenibilidad agrícola (71). 2016 marcó el inicio de la investigación para identificar alternativas ecológicas que mejoren la nutrición y la protección de los cultivos mediante la aplicación de microalgas y cianobacterias. Este año, se evaluó inicialmente la eficacia de la biomasa de microalgas cultivada en aguas residuales, utilizada como biofertilizante y bioestimulante en el trigo (14). Esta línea de investigación se amplió para incluir diversos insumos desde extractos de algas hasta subproductos como las cáscaras de las gambas, y se exploró el potencial de las microalgas como fertilizante orgánico de liberación lenta en cultivos como el tomate (72). Además, se identificaron propiedades bioestimulantes en el microalga *Acutodesmus dimorphus*, y se analizó el papel integral de las cianobacterias en procesos como la solubilización de fósforo, el desarrollo de medios orgánicos certificados y la protección de cultivos (22).

Durante el año 2017, la investigación se orientó hacia la evaluación de alternativas ecológicas mediante ensayos de campo; se demostró la eficacia de biofertilizantes basados en cianobacterias en cultivos de maíz (73) y la utilidad de extractos de algas como bioestimulantes para favorecer el crecimiento de las plantas (74). Asimismo, se exploró el impacto agroecológico y biotecnológico de las cianobacterias, incluyendo el diseño y evaluación de un reactor de biofilm algal destinado al tratamiento de aguas residuales, lo que permitió caracterizar la biomasa generada y

proponer aplicaciones diversificadas (75). En 2018, la línea de investigación adoptó un enfoque multidisciplinar: por un lado, se examinó el potencial de las microalgas y cianobacterias como biofertilizantes para optimizar el crecimiento y la productividad en cultivos como el arroz (13); por otro lado, se investigaron compuestos específicos, como los exopolisacáridos de *Dunaliella salina*, para conferir tolerancia al estrés salar en tomates (15). La incorporación de estos organismos en estrategias de economía circular, junto con la evaluación del impacto de tecnologías basadas en algas azul-verdosas y el papel de las cianobacterias fijadoras de nitrógeno, amplió las perspectivas de aplicación en el sector agrícola (76).

En 2019, comenzó un enfoque integral identificando las capacidades de biocontrol de las microalgas y cianobacterias frente a patógenos fúngicos (77). A partir de ahí, se avanzó en la aplicación de estos insumos en la producción de biofertilizantes y biocombustibles derivados de residuos y aguas residuales, dirigiéndose a cultivos clave como el maíz y la palmera datilera (78). Además, se exploró más a fondo la optimización y valoración de los subproductos, analizando también la influencia de factores ambientales como el CO₂ y las aguas residuales ricas en metales sobre el potencial productivo de las cianobacterias bajo condiciones adversas (79). El año 2020 se caracterizó por un enfoque integrado que combina biotecnología avanzada y uso de recursos microbianos para promover la agricultura sostenible (80). En esta etapa, se exploró primero el ADN recombinante para mejorar la producción de biofertilizantes, facilitando así el uso de biomasa microalgal de cultivos y aguas residuales (81). A continuación, se evaluaron extractos de microalgas y polisacáridos como bioestimulantes, mostrando mejoras en el crecimiento de cultivos como el tomate (82) y optimización en la disponibilidad de fósforo y otros nutrientes en el suelo (35). Además, se investigó la capacidad de especies como *Nostoc muscorum* para mitigar el estrés abiótico, reforzando su potencial en la adaptación de los cultivos a ambientes adversos (83). Estos enfoques se integraron en una estrategia que iba desde la mejora de la productividad agrícola hasta el fortalecimiento de la seguridad alimentaria y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (84).

En 2021, la investigación reveló un enfoque altamente multidisciplinar para integrar soluciones sostenibles en la agricultura moderna. Se examinó el potencial de los biofertilizantes derivados de microalgas y cianobacterias (85), evaluando tanto su influencia en el crecimiento y la productividad de las plantas como su capacidad para mejorar la resiliencia a factores abióticos y bióticos de estrés, como la exposición al cadmio (86). Los estudios incluyeron análisis de respuestas tanto superficiales como subterráneas de cultivos en zonas semiáridas (87), biorremediación de suelos y aguas residuales (88), y optimización de medios de cultivo para la producción a gran escala de biomasa enriquecida en proteínas y bioestimulantes utilizando residuos agrícolas como materia prima (89). Durante 2022, la investigación se centró en el desarrollo e integración de soluciones basadas en cianobacterias, microalgas y macroalgas, utilizando aguas residuales como medio para la producción de biofertilizantes y bioestimulantes, ayudando así a reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos (90). Se implementaron sistemas operativos, como fotobiorreactores y tanques tipo canal de pista, para evaluar la eficacia de estos insumos en la mejora de la calidad del suelo, los rendimientos de los cultivos y la resiliencia ambiental (91).

Además, se evaluaron estrategias de biorremediación orientadas al tratamiento de aguas residuales, la mitigación de emisiones atmosféricas, la movilización de minerales y la gestión del estrés abiótico en plantas, integrando el análisis de la aceptación tecnológica por parte de los agricultores y promoviendo un enfoque de economía circular (92). En 2023, la investigación se orientó hacia una transformación integral y de vanguardia utilizando subproductos y microorganismos para la agricultura sostenible (93). Se analizó más a fondo el impacto de la deshidratación en las propiedades fisicoquímicas y el perfil metabólico no dirigido de *Nostoc calcicola* Bot1, estableciendo una base analítica sólida para evaluar la influencia de condiciones ambientales adversas (94). Paralelamente, se exploraron estrategias de cero residuos en la producción y utilización de *Arthrospira platensis*, destacando su dualidad como fuente de proteína y bioestimulante (95). Posteriormente, el enfoque se diversificó en la búsqueda de alternativas a los fertilizantes químicos mediante la implementación de consorcios y la sinergia entre las algas calcáreas y las cianobacterias, promoviendo alteraciones metabólicas favorables al crecimiento vegetal. Además, la tecnología de tratamiento de aguas residuales se integró con el cultivo de microalgas y la producción de bioproductos de alto valor, afectando directamente la reducción de la huella de carbono y la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (96, 97).

Finalmente, en 2024 se adoptó un enfoque multidisciplinar y circular, partiendo del análisis fundamental de las propiedades fisicoquímicas y metabólicas de microorganismos clave como *Chlorella* sp. y de diversas cianobacterias sometidas a condiciones de estrés y deshidratación, extendiéndose hasta el diseño de sistemas integrados de biorremediación y biorrefinería (7). Se exploraron estrategias de reciclaje heterotrófica aplicadas a aguas residuales de la hidroponía, combinadas con carbono y aportes reguladores, como el ácido indol acético, para transformar estos subproductos en biomasa de alta calidad (92). Al mismo tiempo, se desarrollaron consorcios microalgas-bacterias y se evaluaron métodos para la selección y potenciación de cepas con actividad bioestimulante, confirmadas mediante estudios del ciclo de vida y análisis metaanalíticos, orientados a optimizar la fertilización del suelo, promover el crecimiento de cultivos y mejorar la eficiencia del uso de recursos (98). Este proceso integrador busca crear sistemas de cero residuos que interconecten la producción de biofertilizantes para el tratamiento de aguas residuales e implementen tecnologías emergentes, avanzando hacia una agricultura más sostenible y resiliente (99).

La aplicación de microalgas en suspensión es la opción más sencilla, económica y rentable para biofertilizantes, ya que permite el cultivo, la cosecha y la aplicación directa de la biomasa sin procesos complejos, reduciendo costes y energía, y favoreciendo la acción biológica en la fijación de nitrógeno y la mejora de la microbiota del suelo (93). En comparación, los extractos celulares, a pesar de ofrecer un crecimiento más rápido gracias a sus compuestos bioactivos, requieren procedimientos de alteración celular y un riguroso control de la dosis, lo que incrementa su coste y complejidad (94). La elección entre ambos métodos dependerá del tipo de cultivo, las condiciones del suelo y los objetivos específicos, siendo la suspensión la estrategia preferida para aplicaciones a gran escala (95).

Actualmente, la mayor parte de la investigación sobre el uso de microalgas modificadas se realiza en fases experimentales o precomerciales, donde se han avanzado en eficiencia biosintética y

en la producción de compuestos específicos. Sin embargo, estos desarrollos enfrentan desafíos regulatorios y problemas de aceptación social para su eventual comercialización. Las aprobaciones comerciales no solo deben demostrar su eficacia, sino también garantizar que el uso de organismos modificados no suponga riesgos ecológicos ni para la salud humana (100).

En resumen, la revisión de la trayectoria de investigación en el campo de las microalgas y cianobacterias muestra una evolución significativa en el desarrollo de insumos biológicos y soluciones sostenibles para la agricultura. Los avances descritos ofrecen una base sólida para futuras investigaciones que, mediante la integración de estrategias multidisciplinarias y la optimización de procesos, podrán superar los desafíos actuales y transformar oportunidades en innovaciones de gran impacto para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad medioambiental.

Conclusiones

La tendencia al alza en la producción científica anual entre 2010 y 2024 es evidencia del creciente interés e intensificación de la investigación sobre la aplicación de microalgas como insumos biológicos en la agricultura. Este aumento se refleja no solo en un mayor número de investigaciones y publicaciones, sino también en el avance de proyectos tecnológicos que buscan aprovechar el potencial de las microalgas para mejorar la calidad del suelo y promover prácticas agrícolas sostenibles.

La presente revisión ha destacado el considerable potencial de las microalgas y las cianobacterias para transformar la agricultura sostenible. Su capacidad para sintetizar una amplia gama de compuestos bioactivos, optimizar la absorción de nutrientes, mejorar la tolerancia al estrés y contribuir a la remediación ambiental los posiciona como alternativas prometedoras a los agroquímicos sintéticos. Sin embargo, para lograr estos beneficios, es imprescindible superar los desafíos relacionados con la producción a gran escala, la rentabilidad y los procesos de transformación, lo cual es esencial para garantizar su viabilidad comercial.

En cuanto a la situación en Colombia, las futuras investigaciones deberían centrarse en profundizar en los mecanismos fisiológicos y bioquímicos por los cuales estos organismos impulsan el crecimiento de los cultivos y mejoran la resiliencia al estrés. Es fundamental optimizar las técnicas de cultivo y procesamiento, así como desarrollar métodos de extracción y purificación adaptados a las condiciones agroecológicas locales. Además, explorar aplicaciones innovadoras, como la formulación de biopesticidas y la implementación de procesos de biorremediación, ampliará el espectro de utilidad de estos recursos en el sector agrícola colombiano.

Por último, la colaboración interdisciplinar entre investigadores, agricultores y responsables políticos es esencial para traducir los avances científicos en soluciones prácticas y eficaces. Integrar el cultivo de microalgas con el tratamiento de aguas residuales y seleccionar cepas adaptadas a diversas zonas agroecológicas permitirá establecer estrategias personalizadas que transformen los desafíos actuales en oportunidades de innovación. Juntos, estos esfuerzos fortalecerán la seguridad alimentaria y promoverán la sostenibilidad medioambiental a largo plazo.

Los desafíos futuros incluyen la posibilidad de liberaciones incontroladas de microalgas modificadas y sus posibles efectos a largo plazo en el medio ambiente, lo que subraya la necesidad

Referencias

1. Adedibu PA. Ecological problems of agriculture: impacts and sustainable solutions. ScienceOpen Preprints. 2023. <https://doi.org/10.14293/PR2199.000145.v1>
2. Çakmakçı, R., Salık, M. A., & Çakmakçı, S. Assessment and Principles of Environmentally Sustainable Food and Agriculture Systems. Agriculture, 13(5), 1073. 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051073>
3. Parmar P, Kumar R, Neha Y, Srivatsan V. Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions. Frontiers in Plant Science. 2023 Mar 30;14:1073546. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073546>
4. Ahmad S, Iqbal K, Kothari R, Singh HM, Sari A, Tyagi VV. A critical overview of upstream cultivation and downstream processing of algae-based biofuels: opportunity, technological barriers and future perspective. Journal of Biotechnology. 2022 Jun 10;351:74-98. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2022.03.015>
5. Srivastav AK, Das P, Srivastava AK. Future trends, innovations, and global collaboration. InBiotech and IoT: an introduction using cloud-driven labs 2024 Sep 25 (pp. 309-398). Berkeley, CA: Apress. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0527-1_10
6. Ng ZY, Ajeng AA, Cheah WY, Ng EP, Abdullah R, Ling TC. Towards circular economy: Potential of microalgae–bacterial-based biofertilizer on plants. Journal of environmental management. 2024 Jan 1;349:119445. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119445>Get rights and content
7. Abinandan S, Subashchandrabose SR, Venkateswarlu K, Megharaj M. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health. Critical reviews in biotechnology. 2019 Nov 17;39(8):981-98. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1654972>
8. Renganathan P, Gaysina LA, Holguín-Peña RJ, Sainz-Hernández JC, Ortega-García J, Rueda-Puente EO. Phycoremediated microalgae and cyanobacteria biomass as biofertilizer for sustainable agriculture: A holistic biorefinery approach to promote circular bioeconomy. Biomass. 2024 Sep 24;4(4):1047-77. <https://doi.org/10.3390/biomass4040059>
9. Kholssi R, Lougraimzi H, Grina F, Lorentz JF, Silva I, Castaño-Sánchez O, Marks EA. Green agriculture: a review of the application of micro-and macroalgae and their impact on crop production on soil quality. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2022 Dec;22(4):4627-41. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00944-3>
10. Hamidah I, Pawinanto RE, Mulyanti B, Yunas J. A bibliometric analysis of micro electro mechanical system energy harvester research. Heliyon. 2021 Mar 1;7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06406>
11. Garcia-Gonzalez J, Sommerfeld M. Biofertilizer and biostimulant properties of the microalga *Acutodesmus dimorphus*. Journal of applied phycology. 2016 Apr;28(2):1051-61. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0625-2>
12. Coppens J, Grunert O, Van Den Hende S, Vanhoutte I, Boon N, Haesaert G, De Gelder L. The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. Journal of applied phycology. 2016 Aug;28(4):2367-77. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0775-2>
13. Dineshkumar R, Kumaravel R, Gopalsamy J, Sikder MN, Sampathkumar P. Microalgae as bio-fertilizers for rice growth and seed yield productivity. Waste and biomass valorization. 2018 May;9(5):793-800. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9873-5>
14. Renuka N, Prasanna R, Sood A, Ahluwalia AS, Bansal R, Babu S, Singh R, Shivay YS, Nain L. Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat.

- Environmental science and pollution research. 2016 Apr;23(7):6608-20. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5884-6>
15. El Arroussi H, Benhima R, Elbaouchi A, Sijilmassi B, EL Mernissi N, Aafsar A, Meftah-Kadmiri I, Bendaou N, Smouni A. Dunaliella salina exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). Journal of Applied Phycology. 2018 Oct;30(5):2929-41. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1382-1>
 16. López-Hernández JF, Kean-Meng T, Asencio-Alcudia GG, Asyraf-Kassim M, Alvarez-González CA, Márquez-Rocha FJ. Sustainable microalgae and cyanobacteria biotechnology. Applied Sciences. 2022 Jul 7;12(14):6887. <https://doi.org/10.3390/app12146887>
 17. Siddik, M. A., Sørensen, M., Islam, S. M., Saha, N., Rahman, M. A., & Francis, D. S. Expanded utilisation of microalgae in global aquafeeds. Reviews in Aquaculture, 16(1), 6-33, 2024. <https://doi.org/10.1111/raq.12818>
 18. Bhuyan PP, Nayak R, Jena M, Pradhan B. Convolved role of cyanobacteria as biofertilizer: An insight of sustainable agriculture. Vegetos. 2023 Jun;36(2):309-21. <https://doi.org/10.1007/s42535-022-00415-1>
 19. Wang C, Qi M, Guo J, Zhou C, Yan X, Ruan R, Cheng P. The active phytohormone in microalgae: the characteristics, efficient detection, and their adversity resistance applications. Molecules. 2021 Dec 22;27(1):46. <https://doi.org/10.3390/molecules27010046>
 20. Ding Y, Zhao W, Zhu G, Wang Q, Zhang P, Rui Y. Recent trends in foliar nanofertilizers: a review. Nanomaterials. 2023 Nov 6;13(21):2906. <https://doi.org/10.3390/nano13212906>
 21. Coppens J, Grunert O, Van Den Hende S, Boon N, Haesaert G, De Gelder L. The application of microalgae as a slow-release fertilizer: tomato cultivation as a model. In 1st International seminar on Algal Technologies for Wastewater Treatment and Resource Recovery 2015. UNESCO-IHE. Institute for Water Education. <https://acortar.link/tOJvrC>
 22. Lara GB, Mógor Á, Amatussi JD, Cordeiro EC, Marques HM, Mógor G. Microalga improve the growth, yield, and contents of sugar, amino acid, and protein of tomato. Ciência e Agrotecnologia. 2022 Apr 20;46:e023821. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202246023821>
 23. Rachidi F, Benhima R, Sbabou L, El Arroussi H. Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution. Biotechnology reports. 2020 Mar 1;25:e00426. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00426>
 24. El Arroussi H, Elbaouchi A, Benhima R, Bendaou N, Smouni A, Wahby I. Halophilic microalgae Dunaliella salina extracts improve seed germination and seedling growth of Triticum aestivum L. under salt stress. 2016 Nov 16 Acta Hort. 1148, 13–26 <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1148.2>
 25. Chu Q, Lyu T, Xue L, Yang L, Feng Y, Sha Z, Yue B, Mortimer RJ, Cooper M, Pan G. Hydrothermal carbonization of microalgae for phosphorus recycling from wastewater to crop-soil systems as slow-release fertilizers. Journal of Cleaner Production. 2021 Feb 10;283:124627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124627>
 26. Kholssi R, Marks EA, Miñón J, Montero O, F. Lorentz J, Debdoubi A, Rad C. Biofertilizing effects of Anabaena cylindrica biomass on the growth and nitrogen uptake of wheat. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2022 May 31;53(10):1216-25. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2043350>
 27. Alharbi K, Hafez EM, Omara AE, Nehela Y. Composted bagasse and/or cyanobacteria-based bio-stimulants maintain barley growth and productivity under salinity stress. Plants. 2023 Apr 29;12(9):1827. <https://doi.org/10.3390/plants12091827>

28. Jochum M, Moncayo LP, Jo YK. Microalgal cultivation for biofertilization in rice plants using a vertical semi-closed airlift photobioreactor. *PLoS One*. 2018 Sep 12;13(9):e0203456. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203456>
29. Lamb TI, Berghahn E, Pita FM, de Oliveira Neves L, dos Reis Blasi ÉA, Hofstetter JS, Dammann M, da Silva LC, Buffon G, Dullius A, Granada CE. Isolation and selection of microalgae capable of stimulating rice plant development and seed production. *Algal Research*. 2023 Jul 1;74:103203. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103203>
30. Minello LV, Kuntzler SG, Lamb TI, Neves CD, Berghahn E, da Paschoa RP, Silveira V, de Lima JC, Aguzzoli C, Sperotto RA. Rice plants treated with biochar derived from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) optimize resource allocation towards seed production. *Frontiers in Plant Science*. 2024 Sep 18;15:1422935. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1422935>
31. Nayak M, Swain DK, Sen R. Strategic valorization of de-oiled microalgal biomass waste as biofertilizer for sustainable and improved agriculture of rice (*Oryza sativa* L.) crop. *Science of the Total Environment*. 2019 Sep 10;682:475-84. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.123>
32. Viegas C, Gouveia L, Gonçalves M. Aquaculture wastewater treatment through microalgal. Biomass potential applications on animal feed, agriculture, and energy. *Journal of Environmental Management*. 2021 May 15;286:112187. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112187>
33. Ferreira A, Figueiredo D, Ferreira F, Marujo A, Bastos CR, Martin-Atanes G, Ribeiro B, Štěrbová K, Marques-dos-Santos C, Acién FG, Gouveia L. From piggery wastewater to wheat using microalgae towards zero waste. *Algal Research*. 2023 May 1;72:103153. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103153>
34. Dineshkumar R, Subramanian J, Gopalsamy J, Jayasingam P, Arumugam A, Kannadasan S, Sampathkumar P. The impact of using microalgae as biofertilizer in maize (*Zea mays* L.). *Waste and Biomass Valorization*. 2019 May 1;10(5):1101-10. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0123-7>
35. Ekinici K, Erdal I, Uysal Ö, Uysal FÖ, Tuncel H, Doğan A. Anaerobic digestion of three microalgae biomasses and assessment of digestates as biofertilizer for plant growth. *Environmental progress & sustainable energy*. 2019 May;38(3):e13024. <https://doi.org/10.1002/ep.13024>
36. de Siqueira Castro J, Calijuri ML, Mattiello EM, Ribeiro VJ, Assemany PP. Algal biomass from wastewater: soil phosphorus bioavailability and plants productivity. *Science of the total environment*. 2020 Apr 1;711:135088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135088>
37. Nivetha N, Shukla PS, Nori SS, Kumar S, Suryanarayan S. A red seaweed *Kappaphycus alvarezii*-based biostimulant (AgroGain®) improves the growth of *Zea mays* and impacts agricultural sustainability by beneficially priming rhizosphere soil microbial community. *Frontiers in Microbiology*. 2024 Apr 2;15:1330237. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1330237>
38. Abd Elhafiz A, Abd Elhafiz A, Gaur SS, Hamdany N, Osman M, Lakshmi TR. *Chlorella vulgaris* and *Chlorella pyrenoidosa* live cells appear to be promising sustainable biofertilizer to grow rice, lettuce, cucumber and eggplant in the UAE soils. *Recent Research in Science and Technology*. 2015;7:14-21. <https://doi.org/10.19071/rrst.2015.v7.2919>
39. Mógor ÁF, Ördög V, Lima GP, Molnár Z, Mógor G. Biostimulant properties of cyanobacterial hydrolysate related to polyamines. *Journal of Applied Phycology*. 2018 Feb;30(1):453-60. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1242-z>
40. Barone V, Baglieri A, Stevanato P, Broccanella C, Bertoldo G, Bertaggia M, Cagnin M, Pizzeghello D, Moliterni VM, Mandolino G, Fornasier F. Root morphological and molecular responses induced by microalgae extracts in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Applied Phycology*. 2018 Apr;30(2):1061-71. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1283-3>

41. Srivastava S, Srivastava S, Bist V, Awasthi S, Chauhan R, Chaudhry V, Singh PC, Dwivedi S, Niranjana A, Agrawal L, Chauhan PS. *Chlorella vulgaris* and *Pseudomonas putida* interaction modulates phosphate trafficking for reduced arsenic uptake in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of hazardous materials*. 2018 Jun 5;351:177-87. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.039>
42. Alvarenga P, Martins M, Ribeiro H, Mota M, Guerra I, Cardoso H, Silva JL. Evaluation of the fertilizer potential of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* grown in agricultural drainage water from maize fields. *Science of the Total Environment*. 2023 Feb 25;861:160670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160670>
43. Díaz LE, Gonzalez JD, Morales-Gonzalez MP, Garzón-Castro CL. Harnessing the power of microalgae consortia for sustainable crop production: case study on lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Applied Phycology*. 2024 Dec;36(6):3273-86. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03308-9>
44. Mostafa SS, El-Hassanin AS, Soliman AS, El-Chaghaby GA, Rashad S, Elgaml NM, Awad AA. Phycoremediation of potato industry wastewater for nutrient recovery, pollution reduction, and biofertilizer production for greenhouse cultivation of lettuce and celery in sandy soils. *International Journal of Plant Biology*. 2024 Jul 15;15(3):652-72. <https://doi.org/10.3390/ijpb15030048>
45. Gharib FA, Osama K, Sattar AM, Ahmed EZ. Impact of *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis salina*, and *Arthrospira platensis* as bio-stimulants on common bean plant growth, yield and antioxidant capacity. *Scientific Reports*. 2024 Jan 16;14(1):1398. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50040-4>
46. Dineshkumar R, Subramanian J, Sampathkumar P. Prospective of *Chlorella vulgaris* to augment growth and yield parameters along with superior seed qualities in black gram, *Vigna mungo* (L.). *Waste and Biomass Valorization*. 2020 Apr;11(4):1279-87. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0465-9>
47. Lv J, Liu S, Feng J, Liu Q, Guo J, Wang L, Jiao X, Xie S. Effects of microalgal biomass as biofertilizer on the growth of cucumber and microbial communities in the cucumber rhizosphere. *Turkish Journal of Botany*. 2020;44(2):167-77. <https://doi.org/10.3906/bot-1906-1>
48. Dineshkumar R, Subramanian J, Arumugam A, Ahamed Rasheeq A, Sampathkumar P. Exploring the microalgae biofertilizer effect on onion cultivation by field experiment. *Waste and Biomass Valorization*. 2020 Jan;11(1):77-87. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0466-8>
49. Gemin LG, Mógor ÁF, Amatuzzi JD, De Lara GB, Mógor G. Organic onion growth, yield and storage improved by foliar sprays of microalgae and fulvic acid as a natural biofertilizer. *Bioscience Journal*. 2022 Jan 1;38(e38045):1981-3163. <https://doi.org/10.14393/BJ-v38n0a2022-58854>
50. Dasgan HY, Aldiyab A, Elgudayem F, Ikiz B, Gruda NS. Effect of biofertilizers on leaf yield, nitrate amount, mineral content and antioxidants of basil (*Ocimum basilicum* L.) in a floating culture. *Scientific Reports*. 2022 Dec 3;12(1):20917. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24799-x>
51. Sharma GK, Khan SA, Shrivastava M, Bhattacharyya R, Sharma A, Gupta DK, Kishore P, Gupta N. Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management*. 2021 Jun 1;287:112295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112295>
52. Ma C, Cui H, Ren C, Yang J, Liu Z, Tang T, Ji C, Zhang C, Xue J, Li R. The seed primer and biofertilizer performances of living *Chlorella pyrenoidosa* on *Chenopodium quinoa* under saline-alkali condition. *Journal of Applied Phycology*. 2022 Jun;34(3):1621-34. <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02699-x>

53. Lee Y, Cho G, Jo GS, Kwak YS. Effect of microalgae *Chlorella fusca* CHK0059 on the microbiota community in nursery strawberry. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*. 2023 Aug;64(4):547-56. <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00490-y>
54. Butzke VL, Ferreira A, de Oliveira Corrêa D, Furlan JM, Gouveia L, de Cássia de Souza Schneider R, Corbellini VA. Unlocking the potential of *Euglena gracilis* cultivated in piggery wastewater: biomass production, nutrient removal, and biostimulant potential in lettuce and tomato plants. *Journal of Applied Phycology*. 2024 Oct;36(5):2681-702. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03286-y>
55. Deepika P, MubarakAli D. Production and assessment of microalgal liquid fertilizer for the enhanced growth of four crop plants. *Biocatal. Agric. Biotechnol*. 2020 28, 101701. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101701>
56. Zarezadeh S, Moheimani NR, Jenkins SN, Hülsen T, Riahi H, Mickan BS. Microalgae and phototrophic purple bacteria for nutrient recovery from agri-industrial effluents: influences on plant growth, rhizosphere bacteria, and putative carbon-and nitrogen-cycling genes. *Frontiers in plant science*. 2019 Sep 27;10:1193. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01193>
57. Zhang B, Li W, Guo Y, Zhang Z, Shi W, Cui F, Lens PN, Tay JH. Microalgal-bacterial consortia: from interspecies interactions to biotechnological applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020 Feb 1;118:109563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109563>
58. González-González LM, De-Bashan LE. Toward the enhancement of microalgal metabolite production through microalgae–bacteria consortia. *Biology*. 2021 Apr 1;10(4):282. <https://doi.org/10.3390/biology10040282>
59. Tong CY, Honda K, Derek CJ. A review on microalgal-bacterial co-culture: The multifaceted role of beneficial bacteria towards enhancement of microalgal metabolite production. *Environmental research*. 2023 Jul 1;228:115872. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115872>
60. Juszczuk-Kubiak E. Molecular aspects of the functioning of pathogenic bacteria biofilm based on quorum sensing (QS) signal-response system and innovative non-antibiotic strategies for their elimination. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024 Feb 24;25(5):2655. <https://doi.org/10.3390/ijms25052655>
61. Singh H, Kumar N, Kumar A. Enhancing resource use efficiency in crops through plant functional traits. In *Plant Functional Traits for Improving Productivity* 2024 Apr 23 (pp. 97-117). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1510-7_6
62. Villanueva-González CE, Pérez-Olmos KN, Mollinedo MS, Lojka B. Exploring agroforestry and food security in Latin America: a systematic review. *Environment, Development and Sustainability*. 2024 Sep 9:1-7. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05352-4>
63. Borón V, Payán E, MacMillan D, Tzanopoulos J. Achieving sustainable development in rural areas in Colombia: Future scenarios for biodiversity conservation under land use change. *Land use policy*. 2016 Dec 31;59:27-37. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.017>
64. Kholssi R, Marks EA, Miñón J, Montero O, Deboudi A, Rad C. Biofertilizing effect of *Chlorella sorokiniana* suspensions on wheat growth. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2019 Jun 15;38(2):644-9. <https://doi.org/10.1007/s00344-018-9879-7>
65. Salazar CA, Cardona YA, Osorio LA, Porras LM. Efecto de un Consorcio de cianobacterias sobre la obtención de biomasa vegetal de la gulupa (*Passiflora edulis* f. *edulis* Sims) bajo condiciones de campo en el municipio de Marinilla-Antioquia. *Hechos Microbiológicos*. 2020 Oct 26;11(1 y 2):12-21. <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v11n1a02>
66. González AR, Orozco AD, Gonzalez AI, Navas JD, Rodriguez YY, Isaza AV, Arrieta DV, Cárdenas DS. Efecto del extracto de *Limnospira maxima* sobre parámetros fisiológicos de *Stevia rebaudiana* Bert. y *berenjena Solanum melongena* L. bajo condiciones controladas. *Temas agrarios*. 2023 Dec 23;28(2):178-92. <https://doi.org/10.21897/qcvsn05>

67. Habib K, Kumar S, Manikar N, Zutshi S, Fatma T. Biochemical effect of carbaryl on oxidative stress, antioxidant enzymes and osmolytes of cyanobacterium *Calothrix brevissima*. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2011 Dec;87(6):615-20. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0410-0>
68. Sharma NK, Tiwari SP, Tripathi K, Rai AK. Sustainability and cyanobacteria (blue-green algae): facts and challenges. *Journal of Applied Phycology*. 2011 Dec;23(6):1059-81. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9626-3>
69. Singh JS, Pandey VC, Singh DP. Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, ecosystems & environment*. 2011 Mar 1;140(3-4):339-53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
70. Bhardwaj D, Ansari MW, Sahoo RK, Tuteja N. Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microbial cell factories*. 2014 May 8;13(1):66. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-66>
71. Choudhary, K. K., & Dhar, D. W. *Microbes in Soil and Their Agricultural Prospects*. Hauppauge, NY, USA: Nova Publishers. 2015. <https://acortar.link/P58LM5>
72. Blanke, M. Biostimulants—a wide range from algae extracts to shrimp shells. *Erwerbs-Obstbau*, 2016 58, 81-87,
73. Yadav S, Rai S, Rai R, Shankar A, Singh S, Rai LC. Cyanobacteria: Role in agriculture, environmental sustainability, biotechnological potential and agroecological impact. In *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives: Volume 2: Microbial Interactions and Agro-Ecological Impacts* 2017 Dec 16 (pp. 257-277). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_10
74. Satish L, Ramesh M. Algae-based extracts as a natural biostimulant for plant growth and development: Current and future prospects. In *Photobioreactors: Advancements, Applications and Research* 2017 Jan 1 (pp. 1-13). Nova Science Publishers, Inc.
75. Choudhary P, Prajapati SK, Kumar P, Malik A, Pant KK. Development and performance evaluation of an algal biofilm reactor for treatment of multiple wastewaters and characterization of biomass for diverse applications. *Bioresource technology*. 2017 Jan 1;224:276-84. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.078>
76. Stiles WA, Styles D, Chapman SP, Esteves S, Bywater A, Melville L, Silkina A, Lupatsch I, Grünwald CF, Lovitt R, Chaloner T. Using microalgae in the circular economy to valorise anaerobic digestate: challenges and opportunities. *Bioresource technology*. 2018 Nov 1;267:732-42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.100>
77. Righini H, Roberti R. Algae and cyanobacteria as biocontrol agents of fungal plant pathogens. *InPlant microbe interface* 2019. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19831-2_9
78. Saadaoui I, Sedky R, Rasheed R, Bounnit T, Almahmoud A, Elshekh A, Dalgamouni T, al Jmal K, Das P, Al Jabri H. Assessment of the algae-based biofertilizer influence on date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cultivation. *Journal of Applied Phycology*. 2019 Feb;31(1):457-63. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1539-6>
79. Velu C, Cirés S, Brinkman DL, Heimann K. Effect of CO₂ and metal-rich waste water on bioproduct potential of the diazotrophic freshwater cyanobacterium, *Tolypothrix* sp. *Heliyon*. 2019 Apr 1;5(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01549>
80. Dilnashin H, Birla H, Hoat TX, Singh HB, Singh SP, Keswani C. Applications of agriculturally important microorganisms for sustainable crop production. In *Molecular aspects of plant beneficial microbes in agriculture* 2020. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818469-1.00033-X>

81. Ali R. Role of recombinant DNA technology in biofertilizer production. In *Microbiota and biofertilizers: a sustainable continuum for plant and soil health* 2020. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3_9
82. Supraja KV, Behera B, Balasubramanian P. Efficacy of microalgal extracts as biostimulants through seed treatment and foliar spray for tomato cultivation. *Industrial crops and products*. 2020 Sep 1;151:112453. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112453>
83. Shamim A, Mahfooz S, Hussain A, Farooqui A. Ability of Alacclimatized immobilized *Nostoc muscorum* to combat abiotic stress and its potential as a biofertilizer. *J Pure Appl Microbiol*. 2020 Jun 1;14(2):1377-86. <https://doi.org/10.22207/JPAM.14.2.35>
84. Suleiman AK, Lourenço KS, Clark C, Luz RL, da Silva GH, Vet LE, Cantarella H, Fernandes TV, Kuramae EE. From toilet to agriculture: Fertilization with microalgal biomass from wastewater impacts the soil and rhizosphere active microbiomes, greenhouse gas emissions and plant growth. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020 Oct 1;161:104924. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104924>
85. Chakraborty T, Akhtar N. Biofertilizers: Characteristic features and applications. *Biofertilizers: Study and Impact*. 2021 Jul 20:429-89. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch15>
86. Ismail GS, Saber NE, Abdelrahim BI, Abou-Zeid HM. Influence of Cyanobacterial Biofertilizer on the Response of Zea mays Plant to Cadmium-stress. *Egyptian Journal of Botany*. 2021 Aug 1;61(2):391-404. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2020.41791.1553>
87. Goemann HM, Gay JD, Mueller RC, Brookshire EN, Miller P, Poulter B, Peyton BM. Aboveground and belowground responses to cyanobacterial biofertilizer supplement in a semi-arid, perennial bioenergy cropping system. *GCB Bioenergy*. 2021 Dec;13(12):1908-23. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12892>
88. Sabarinathan KG, Gomathy M, Kumar DA, Kannan R, Aiyathan KE. Cyanobacteria-Mediated Bioremediation of Problem Soils. In *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment: Volume 1* 2021 Jan 16 (pp. 141-152). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7447-4_5
89. Gómez C, Guzmán-Carrasco A, Lafarga T, Acien-Fernández FG. Optimization of a new culture medium for the large-scale production of protein-rich *Arthrospira platensis* (Oscillatoriales, Cyanophyceae). *Journal of Phycology*. 2021 Apr;57(2):636-44. <https://doi.org/10.1111/jpy.13111>
90. Dagnais LS, Dos Santos MG, Rita AV, Chaves Cardoso J, De Carvalho DF, De Mendonça HV. Microalgae as bio-fertilizer: a new strategy for advancing modern agriculture, wastewater bioremediation, and atmospheric carbon mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022 Nov;233(11):477. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05917-x>
91. Morillas-España A, Villaró S, Ciardi M, Acien G, Lafarga T. Production of *Scenedesmus almeriensis* using pilot-scale raceway reactors located inside a greenhouse. *Phycology*. 2022 Jan 12;2(1):76-85. <https://doi.org/10.3390/phycology2010005>
92. Pekkoh J, Wichaphian A, Kamngoen A, Sriket N, Zin MT, Lomakool S, Maneechote W, Chromkaew Y, Pathom-aree W, Cheirsilp B, Srinuanpan S. Heterotrophic upcycling of hydroponic wastewater supplemented with glucose and indole-3-acetic acid into high-quality *Chlorella* biomass for zero-waste multiproduct microalgal biorefinery. *Environmental Technology & Innovation*. 2024 Nov 1;36:103813. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103813>
93. Braun JC, Colla LM. Use of microalgae for the development of biofertilizers and biostimulants. *BioEnergy Research*. 2023 Mar;16(1):289-310. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10456-8>
94. Liu Y, Liu X, Cui Y, Yuan W. Ultrasound for microalgal cell disruption and product extraction: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022 Jun 1;87:106054. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106054>

95. Osorio-Reyes JG, Valenzuela-Amaro HM, Pizaña-Aranda JJ, Ramírez-Gamboa D, Meléndez-Sánchez ER, López-Arellanes ME, Castañeda-Antonio MD, Coronado-Apodaca KG, Gomes Araújo R, Sosa-Hernández JE, Melchor-Martínez EM. Microalgae-based biotechnology as alternative biofertilizers for soil enhancement and carbon footprint reduction: Advantages and implications. *Marine Drugs*. 2023 Jan 28;21(2):93. <https://doi.org/10.3390/md21020093>
96. Sharma I, Sandeep, Bala R, Kundra N, Kaur T, Sharma A. Microalgae-mediated wastewater treatment for biofertilizer production. In: Singh, P., Verma, P., Singh, R.P. (eds) *Wastewater Resource Recovery and Biological Methods*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40198-5_11.
97. Mouga T, Simões F, Moreira V, Martins A, Ferreira C, Ramos R, Afonso C. Producing Cyanobacteria to Use as Biostimulants. *Proceedings of the 2nd International Conference on Water Energy Food and Sustainability (ICoWEFS 2022)*. ICoWEFS 2022. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26849-6_4
98. Just BS, Marks EA, Roquer-Beni L, Llenas L, Ponsà S, Vilaplana R. Biofertilization increases soil organic carbon concentrations: Results of a meta-analysis. *International Journal of Agricultural Sustainability*. 2024 Dec 31;22(1):2361578. <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2361578>
99. Wichaphian A, Kaewman N, Pathom-Aree W, Phinyo K, Pekkoh J, Chromkaew Y, Cheirsilp B, Srinuanpan S. Zero-waste biorefining co-products from ultrasonically assisted deep eutectic solvent-pretreated *Chlorella* biomass: Sustainable production of biodiesel and bio-fertilizer. *Bioresource Technology*. 2024 Sep 1;408:131163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131163>
100. EFSA Panel on Genetically Modified Organisms (GMO), Mullins E, Bresson JL, Dewhurst IC, Epstein MM, Firbank LG, Guerche P, Hejatko J, Moreno FJ, Naegeli H, Nogué F. New developments in biotechnology applied to microorganisms. *EFSA Journal*. 2024 Jul;22(7):e8895. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8895>