

Artículos atravesados por (o cuestionando) la idea del sujeto -y su género- como una construcción psicobiológica de la cultura.
Articles driven by (or questioning) the idea of the subject -and their gender- as a cultural psychobiological construction.
Vol. 11 (2026), enero-diciembre
ISSN 2469-0783

POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE LAS MICROALGAS COMO BIOFERTILIZANTES PARA MITIGAR EL ESTRÉS SALINO EN CULTIVOS

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF MICROALGAE AS BIOFERTILIZERS TO MITIGATE SALINE STRESS IN CROPS

Rosa Sarahi González Sarmiento rosasars.09@gmail.com
Universidad Autónoma Indígena de México, México
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1248-1829>

Israel Osuna Flores iosuna@uaim.edu.mx
Universidad Autónoma Indígena de México, México.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0199-2983>

Arturo Rafael Armenta López aral-150494@hotmail.com
Universidad Autónoma Indígena de México, México.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7417-3121>

Cómo citar este artículo / Citation: González Sarmiento, R. S., Osuna Flores, I. & Armenta López, A. R. (2026). Potencial biotecnológico de las microalgas como biofertilizantes para mitigar el estrés salino en cultivos. *Revista Científica Arbitrada de la Fundación MenteClara*, Vol. 11 (430). DOI: <https://doi.org/10.32351/rca.v11.430>

Copyright: © 2026 RCAFMC. Este artículo de acceso abierto es distribuido bajo los términos de la licencia [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
Recibido: 03/07/2026. Aceptado: 07/07/2026. Publicación online: 11/07/2026.

Conflicto de intereses: Ninguno que declarar.

Resumen

La salinización de los suelos limita la productividad agrícola mundial al afectar el crecimiento, la absorción de nutrientes y el rendimiento de los cultivos. Las microalgas han emergido como una alternativa biotecnológica sostenible por su capacidad para actuar como biofertilizantes y bioestimulantes. Estos microorganismos fotosintéticos producen fitohormonas, aminoácidos, polisacáridos y antioxidantes que favorecen el crecimiento vegetal y aumentan la tolerancia al estrés salino. El objetivo de esta revisión de alcance es sintetizar la evidencia disponible sobre el potencial de las microalgas como biofertilizantes en cultivos bajo salinidad,

describiendo los mecanismos de acción, las especies más utilizadas, los métodos de aplicación, las ventajas, las limitaciones y las perspectivas futuras. La evidencia recopilada muestra que géneros como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Dunaliella*, *Arthrospira* y diversas cianobacterias mejoran la eficiencia nutricional, incrementan la actividad antioxidante, favorecen el equilibrio iónico y reducen el daño oxidativo inducido por el exceso de sales. Las aplicaciones reportadas incrementan el rendimiento de los cultivos entre 10% y 40%, mientras que las cianobacterias fijadoras de nitrógeno pueden contribuir con hasta 30 kg N ha⁻¹ temporada⁻¹. Estudios moleculares recientes indican que los bioestimulantes de origen microalgal regulan la expresión de genes de respuesta al estrés, mejoran la biosíntesis de osmolitos y potencian la desintoxicación de especies reactivas de oxígeno. No obstante, persisten desafíos importantes relacionados con la estandarización de formulaciones, la escalabilidad industrial y la comprensión detallada de sus mecanismos moleculares de acción.

Abstract

Soil salinization limits global agricultural productivity by affecting growth, nutrient uptake, and crop yield. Microalgae have emerged as a sustainable biotechnological alternative due to their ability to act as biofertilizers and biostimulants. These photosynthetic microorganisms produce phytohormones, amino acids, polysaccharides, and antioxidants that promote plant growth and increase tolerance to saline stress. The objective of this scoping review is to synthesize the available evidence on the potential of microalgae as biofertilizers in crops under salinity, describing their mechanisms of action, most used species, application methods, advantages, limitations, and future perspectives. The collected evidence shows that genera such as *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Dunaliella*, *Arthrospira*, and several cyanobacteria improve nutritional efficiency, increase antioxidant activity, promote ionic balance, and reduce oxidative damage induced by excess salts. Reported applications increase crop yields between 10% and 40%, while nitrogen-fixing cyanobacteria can contribute up to 30 kg N ha⁻¹ season⁻¹. Recent molecular studies indicate that microalgal biostimulants regulate the expression of stress-responsive genes, improve osmolyte biosynthesis, and enhance the detoxification of reactive oxygen species. However, important challenges persist regarding formulation

standardization, industrial scalability, and the detailed understanding of their molecular mechanisms of action.

Palabras Claves: microalgas; biofertilizantes; bioestimulantes; estrés salino; agricultura sostenible; biotecnología

Keywords: microalgae; biofertilizers; biostimulants; saline stress; sustainable agriculture; biotechnology

1. Introducción

La salinidad del suelo es uno de los problemas ambientales más importantes para la agricultura moderna. Se estima que cientos de millones de hectáreas presentan distintos grados de salinización, lo que limita la absorción de agua, altera el equilibrio iónico celular y disminuye significativamente el rendimiento de los cultivos (Munns & Tester, 2008; FAO, 2021). El incremento de este fenómeno se relaciona estrechamente con el cambio climático, la degradación de los recursos edáficos y el uso inadecuado del riego (Shrivastava & Kumar, 2015). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se estima que para 2050 la población mundial alcanzará los 9.700 millones de personas, lo que requerirá un incremento del 70% en la producción de alimentos, intensificando la presión sobre suelos ya degradados (FAO, 2022).

Los métodos tradicionales para subsanar el problema de la salinidad suelen implicar elevados costos económicos y ambientales debido al uso intensivo de fertilizantes químicos y mejoradores sintéticos. Por lo que la agricultura sostenible ha orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de bioinsumos capaces de mejorar la productividad agrícola mitigando el impacto ambiental (Parida & Das, 2005; du Jardin, 2015). Entre estas alternativas tenemos las microalgas y las cianobacterias, organismos fotosintéticos capaces de producir una amplia variedad de compuestos bioactivos con efectos positivos sobre las plantas (Ronga et al., 2019; Alvarez et al., 2021; Gonçalves et al., 2023). El mercado global de bioestimulantes fue valorado en aproximadamente 3.100 millones de dólares, reflejando una creciente adopción, con evidencia que indica una reducción en los costos de insumos y una mejora en la productividad a largo plazo (MarketsandMarkets, 2025). Asimismo, el análisis bibliométrico revela un crecimiento acelerado, con investigaciones sobre

bioestimulantes basados en microalgas que pasaron de menos de cinco publicaciones en 2016 a más de treinta en 2022 (Miranda et al., 2024).

Las microalgas pueden emplearse tanto como biofertilizantes como bioestimulantes. Su biomasa contiene macronutrientes, micronutrientes, aminoácidos, vitaminas, polisacáridos extracelulares y fitohormonas, incluyendo auxinas, giberelinas y citoquininas, las cuales estimulan el desarrollo radicular, incrementan la eficiencia fotosintética y fortalecen los mecanismos antioxidantes involucrados en la respuesta al estrés salino (Yakhin et al., 2017; Rouphael & Colla, 2018; González-Pérez et al., 2022). Estudios moleculares recientes han demostrado que los bioestimulantes derivados de algas regulan la expresión de genes de respuesta al estrés y mejoran la biosíntesis de osmolitos en plantas sometidas a estrés abiótico (Zhou et al., 2020; Shelar et al., 2024).

A pesar de estos avances, la literatura actual permanece frecuentemente fragmentada, con numerosas revisiones enfocadas principalmente en extractos de algas marinas o productos comerciales, otorgando atención limitada a la integración de la biotecnología microalgal, la fisiología molecular del estrés y los marcos de sostenibilidad ambiental (Gonçalves et al., 2023; Melo et al., 2023). Pocos estudios abordan de manera integral la conexión entre los mecanismos moleculares y los desarrollos tecnológicos en cultivo, procesamiento de biomasa e implementación agrícola a gran escala (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026). Por lo tanto, la presente revisión aborda estos vacíos presentando a las microalgas como un enfoque integrador que conecta los avances en biotecnología algal, la fisiología del estrés vegetal y la agricultura sostenible.

El objetivo del presente trabajo es analizar el potencial biotecnológico de las microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes para contrarrestar el severo problema del estrés salino en cultivos agrícolas. Específicamente, esta revisión busca: (a) identificar las especies de microalgas y cianobacterias más estudiadas; (b) describir los mecanismos fisiológicos y bioquímicos de acción reportados; (c) analizar los efectos sobre el crecimiento, rendimiento y fisiología de los cultivos; y (d) identificar las principales limitaciones y vacíos de conocimiento para su aplicación comercial.

2. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo el enfoque de una revisión sistemática, con el objetivo de mapear y sintetizar la evidencia científica disponible sobre el uso

de microalgas como biofertilizantes para mitigar el estrés salino en cultivos agrícolas. Este tipo de revisión es particularmente útil cuando el área de estudio es emergente y presenta literatura heterogénea en términos de metodologías, cultivos evaluados y especies de microalgas utilizadas (Arksey & O'Malley, 2005; Levac et al., 2010).

2.1 Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos científicas internacionales de alto impacto, incluyendo: Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect y Google Scholar. El período de búsqueda cubrió publicaciones de 2005 al 2026. Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como: "microalgae" AND "biofertilizer"; "microalgae" AND "salt stress"; "cyanobacteria" AND "biostimulant"; "salinity stress" AND "plant growth"; y "biofertilizers" AND "soil salinity". Para la búsqueda específica en bases de datos, se adaptó el vocabulario controlado, por ejemplo: (TITLE-ABS-KEY ("microalgae" OR "cyanobacteria" OR "spirulina") AND TITLE-ABS-KEY ("biofertilizer" OR "biostimulant") AND TITLE-ABS-KEY ("salt stress" OR "salinity" OR "saline stress")).

2.2 Criterios de inclusión y exclusión

Se establecieron los siguientes criterios para la selección de estudios:

Criterios de inclusión: Artículos originales y revisiones científicas en revistas indexadas; estudios que evaluaran microalgas o cianobacterias como biofertilizantes o bioestimulantes; investigaciones enfocadas en estrés salino o condiciones de salinidad en plantas; estudios en cultivos agrícolas (hortícolas, cereales, leguminosas u ornamentales).

Criterios de exclusión: Estudios no relacionados con agricultura (ej. farmacología o acuicultura sin aplicación vegetal); artículos duplicados; estudios sin evaluación experimental o sin datos claros sobre efectos en plantas; y literatura gris sin revisión por pares.

2.3 Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se realizó en tres etapas:

1. **Identificación:** recuperación inicial de artículos mediante bases de datos.
2. **Cribado:** eliminación de duplicados y revisión de títulos y resúmenes.
3. **Elegibilidad:** revisión del texto completo para confirmar su relevancia.

Este proceso permitió garantizar la calidad y pertinencia de los estudios incluidos en la síntesis final.

2.4 Extracción y análisis de datos

De cada estudio seleccionado se extrajeron los siguientes datos: autor y año de publicación; especie de microalga o cianobacteria utilizada; tipo de cultivo evaluado; tipo de estrés salino aplicado; método de aplicación (extracto, biomasa, inoculación, etc.); principales resultados fisiológicos y agronómicos; y mecanismos propuestos de acción. Los datos fueron organizados en tablas comparativas resumidas para facilitar la identificación de patrones comunes en los efectos de las microalgas sobre la tolerancia al estrés salino (Munns & Tester, 2008; du Jardin, 2015).

2.5 Síntesis de la información

La información se sintetizó mediante un enfoque cualitativo-descriptivo, agrupando los resultados en categorías temáticas: mecanismos fisiológicos de acción; respuestas bioquímicas en plantas; mejora del crecimiento y productividad; e interacción suelo–microorganismo–planta. Este enfoque permite integrar evidencia heterogénea sin necesidad de realizar un meta-análisis cuantitativo, lo cual es consistente con el propósito exploratorio de una revisión de alcance (Peters et al., 2020).

3. Microalgas como recurso biotecnológico

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares o coloniales que presentan una elevada eficiencia en la conversión de energía solar en biomasa. Su rápido crecimiento, capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y diversidad metabólica las convierten en una fuente altamente prometedora para aplicaciones biotecnológicas en la agricultura (Barsanti & Gualtieri, 2014; Ronga et al., 2019).

En el aspecto agrícola, las microalgas están ganando relevancia como insumos sostenibles debido a su capacidad para producir compuestos bioactivos que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la tolerancia a factores de estrés abiótico, especialmente la salinidad y la sequía (Gonçalves et al., 2023). Estudios recientes han demostrado que las microalgas y cianobacterias son cada vez más reconocidas como bioestimulantes vegetales capaces de mejorar el crecimiento, la absorción de

nutrientes y la tolerancia al estrés ambiental (Chabili et al., 2023). Los compuestos derivados de algas regulan la señalización de fitohormonas, mejoran la eficiencia en el uso del nitrógeno y estimulan los sistemas de defensa antioxidante en cultivos (Zhou et al., 2020).

Entre los géneros más estudiados por su aplicación como biofertilizantes y bioestimulantes destacan: *Chlorella* spp., *Scenedesmus* spp., *Arthrospira platensis* (*Spirulina*), *Dunaliella salina*, *Nostoc* spp. y *Anabaena* spp. Estos microorganismos han sido ampliamente investigados debido a su alto contenido de biomoléculas bioactivas y su facilidad de cultivo a escala laboratorio e industrial (González-Pérez et al., 2022). *Chlorella vulgaris* (2–10 μ m) presenta un contenido proteico notablemente alto (50–60% del peso seco), aminoácidos esenciales, vitaminas y fitohormonas, incluyendo auxina (AIA), citoquininas y giberelinas (GA) (Ronga et al., 2019; González-Pérez et al., 2022). *Spirulina platensis* es rica en proteínas (60–70% del peso seco) y promueve la germinación de semillas y la tolerancia al estrés (Gonçalves et al., 2023). Cianobacterias como *Anabaena torulosa* contribuyen a un mejor desempeño de las plantas y mejoran la disponibilidad de nitrógeno en el suelo hasta 1.8 veces incluso con solo el 75% del fertilizante N, lo que conduce a una mejora en los rasgos florales de hasta el 35% (Chabili et al., 2024).

3.1 Producción y escalamiento de microalgas

La producción de microalgas a escala industrial presenta un desafío biotecnológico complejo debido a la necesidad de optimizar simultáneamente el crecimiento celular, la eficiencia fotosintética y la viabilidad económica del proceso. De manera general, los sistemas de cultivo se dividen en sistemas abiertos, como estanques tipo *raceway*, y sistemas cerrados, como los fotobiorreactores, cada uno con ventajas y limitaciones específicas en términos de productividad, control ambiental y escalabilidad (Legrand et al., 2021; Weuster-Botz, 2022).

Los sistemas abiertos tipo *raceway* pond son ampliamente utilizados debido a su bajo costo operativo y facilidad de escalamiento. Sin embargo, presentan limitaciones importantes relacionadas con la evaporación de agua, la contaminación y la baja eficiencia en el aprovechamiento de la luz. A pesar de estas restricciones, siguen siendo considerados una de las opciones más viables para producción masiva de biomasa microalgal a nivel comercial (Kusmayadi et al., 2020; Araújo et al., 2021).

Por otro lado, los fotobiorreactores cerrados (tubulares, de panel plano o columna de burbujeo) permiten un mayor control de variables críticas como pH, temperatura, concentración de CO₂ y disponibilidad de luz. Esto mejora significativamente la productividad y reduce el riesgo de contaminación, aunque genera un incremento considerable en los costos de inversión y operación (Barsanti & Gualtieri, 2014; Legrand et al., 2021; Posten, 2021). Los avances recientes en sistemas de cultivo optimizados y técnicas efectivas de procesamiento de biomasa han potenciado aún más el potencial agrícola de las microalgas (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026).

3.2 Microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes

El uso de microalgas en agricultura puede clasificarse en dos grandes categorías:

a) **Biofertilizantes:** Aportan nutrientes esenciales directamente al suelo o a la planta, mejorando la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y micronutrientes.

b) **Bioestimulantes:** No actúan principalmente como fuente de nutrientes, sino que modulan procesos fisiológicos y metabólicos de la planta, mejorando su crecimiento y tolerancia al estrés (du Jardin, 2015).

Como ejemplo tenemos que extractos de *Chlorella vulgaris* y *Arthrospira platensis* incrementan la germinación, la biomasa vegetal y la actividad fotosintética en cultivos sometidos a condiciones de estrés salino, atribuyéndose a la presencia de fitohormonas y antioxidantes naturales (Ronga et al., 2019; González-Pérez et al., 2022).

Las microalgas y cianobacterias han aparecido como una de las alternativas biotecnológicas más prometedoras para la agricultura sostenible debido a su capacidad para actuar simultáneamente como biofertilizantes y bioestimulantes. Estos organismos no solo aportan nutrientes esenciales al suelo y a las plantas, sino que también producen una amplia gama de metabolitos bioactivos que modulan el crecimiento vegetal y mejoran la tolerancia a condiciones de estrés abiótico, especialmente la salinidad (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026).

3.3 Importancia en agricultura sostenible

El uso de microalgas se alinea con los principios de la agricultura sostenible debido a que: reducen la dependencia de fertilizantes sintéticos; aprovechan CO₂ atmosférico o industrial; disminuyen la contaminación del suelo y agua; pueden cultivarse en

tierras no arables; y favorecen la recuperación de suelos degradados. Estas características las posicionan como una tecnología importante dentro de las estrategias de bioeconomía y agricultura regenerativa (Gonçalves et al., 2023).

Las microalgas y cianobacterias han adquirido una relevancia creciente dentro de los sistemas de agricultura sostenible debido a su capacidad para mejorar la productividad agrícola reduciendo el impacto ambiental asociado al uso de fertilizantes químicos. Su integración en sistemas agrícolas modernos obedece a la necesidad global de desarrollar estrategias más eficientes para enfrentar problemas como la escasez de agua, la degradación del suelo y el cambio climático (Brito-López et al., 2025; Sun et al., 2026).

Uno de los principales aportes de las microalgas a la agricultura sostenible es su potencial para reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Estos organismos contienen macronutrientes esenciales como fósforo, nitrógeno y potasio, además de micronutrientes que se liberan gradualmente al suelo, mejorando la eficiencia nutricional de los cultivos (Sun et al., 2026). Se ha demostrado que la aplicación de cianobacterias puede reducir la necesidad de fertilizantes nitrogenados sintéticos hasta en un 25-50% manteniendo rendimientos equivalentes o superiores (Chabili et al., 2023).

4. Mecanismos fisiológicos y moleculares de acción de las microalgas en la mitigación del estrés salino

Las microalgas y cianobacterias presentan efectos positivos sobre las plantas bajo condiciones de estrés salino mediante múltiples mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares que actúan de manera integrada. Estos efectos no dependen de una sola vía de acción, sino de una combinación de procesos que involucran la producción de compuestos bioactivos, la mejora de la nutrición vegetal y la modulación de respuestas antioxidantes y hormonales (Yakhin et al., 2017; Ronga et al., 2019). Esta acción multifactorial es lo que distingue a los bioestimulantes microalgales de los fertilizantes convencionales y explica su eficacia incluso en concentraciones relativamente bajas (Gonçalves et al., 2023; Chabili et al., 2024).

El estrés salino induce en las plantas tres tipos principales de alteraciones: (1) estrés osmótico, (2) toxicidad iónica y (3) estrés oxidativo, los cuales afectan la fotosíntesis y el crecimiento general. Las microalgas mitigan estos efectos a través de mecanismos específicos que se describen a continuación.

4.1 Estrés osmótico y osmoprotección celular

El primer efecto que enfrentan las plantas bajo condiciones salinas es el estrés osmótico, el cual ocurre debido a la disminución del potencial hídrico del suelo. Esto dificulta la absorción de agua por las raíces, generando condiciones fisiológicas similares a la sequía, incluso cuando el suelo contiene humedad (Munns & Tester, 2008). El estrés osmótico provoca deshidratación celular, alteraciones metabólicas severas e inhibición del crecimiento (Zhu et al., 2020; Zhou et al., 2020).

La osmoprotección celular se basa en la capacidad de las plantas para mantener la homeostasis osmótica mediante la acumulación de compuestos orgánicos denominados osmoprotectores o solutos compatibles. Estos compuestos no interfieren con las funciones metabólicas, pero ayudan a equilibrar el potencial hídrico entre el interior celular y el ambiente externo (Zhou et al., 2020S). Las microalgas inducen la acumulación de osmólitos compatibles, tales como: prolina, glicina betaína y azúcares solubles. Estos compuestos permiten mantener el equilibrio osmótico dentro de las células sin interferir con el metabolismo normal (Zhu et al., 2001). El contenido de prolina puede incrementarse hasta en un 60% en plantas tratadas con extractos microalgales bajo estrés salino, contribuyendo significativamente al ajuste osmótico y a la estabilización de membranas (Zhou et al., 2020; Shelar et al., 2024).

4.2 Toxicidad iónica y regulación del equilibrio Na^+/K^+

La toxicidad iónica ocurre cuando existe una acumulación excesiva de iones, principalmente sodio (Na^+) y cloro (Cl^-), en los tejidos vegetales. Esta acumulación interfiere con procesos metabólicos esenciales, altera el equilibrio nutricional y provoca daños celulares que reducen significativamente el crecimiento y la productividad de los cultivos (Isayenkov & Maathuis, 2020; van Zelm et al., 2020). Con el tiempo, el exceso de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-) interfiere con la absorción de nutrientes esenciales como potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), provocando desequilibrios nutricionales severos (Zhu, 2001). La relación Na^+/K^+ es un indicador crítico del estrés salino, y valores superiores a 1.0 generalmente indican toxicidad iónica significativa (Isayenkov & Maathuis, 2020; van Zelm et al., 2020).

La regulación del equilibrio iónico Na^+/K^+ es uno de los mecanismos más críticos en la tolerancia de las plantas al estrés salino. Las microalgas favorecen: exclusión de sodio (Na^+) en raíces; mayor absorción de potasio (K^+); y compartimentalización de

Na⁺ en vacuolas. Esto ayuda a mantener la homeostasis celular y evita la toxicidad iónica en tejidos sensibles (Parida & Das, 2005; Munns & Tester, 2008). Se ha documentado que el tratamiento con *Chlorella* spp. reduce la relación Na⁺/K⁺ en tejidos foliares en un rango del 30% al 50% en comparación con plantas no tratadas bajo condiciones salinas (van Zelm et al., 2020; do Chabili et al., 2023).

4.3 Estrés oxidativo y activación del sistema antioxidante

El estrés oxidativo es uno de los componentes más dañinos del estrés abiótico en plantas. Se produce cuando existe un desequilibrio entre la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la capacidad del sistema antioxidante de la planta para eliminarlas. Este fenómeno provoca daño celular, alteración metabólica y, en casos más graves, muerte celular programada (Waszczak et al., 2018; Hasanuzzaman et al., 2021).

El estrés salino induce la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), tales como: superóxido (O₂⁻), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y radical hidroxilo (•OH). Cuando estas moléculas se acumulan en exceso, generan daño oxidativo en lípidos, proteínas y ADN, afectando la integridad celular (Gill & Tuteja, 2010). La peroxidación lipídica, medida como malondialdehído (MDA), es uno de los biomarcadores más utilizados para evaluar el daño oxidativo inducido por el estrés salino (Hasanuzzaman & Fujita, 2022).

El sistema antioxidante es uno de los principales mecanismos de defensa de las plantas frente a condiciones de estrés abiótico. Las microalgas presentan compuestos antioxidantes como carotenoides, ficobiliproteínas, polifenoles y vitaminas que contribuyen a reducir el daño oxidativo inducido por la salinidad. Estudios recientes han demostrado que la aplicación de extractos de *Arthrospira platensis* incrementa significativamente la actividad de enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT) y la peroxidasa (POD) en cultivos de tomate y pimiento bajo estrés salino, reduciendo los niveles de MDA hasta en un 40% (Zhou et al., 2020; Shelar et al., 2024).

4.4 Impacto en la fotosíntesis y su mitigación

La salinidad afecta directamente la eficiencia fotosintética al provocar: degradación de la clorofila; daño en los fotosistemas I y II; reducción del intercambio gaseoso; y cierre estomático prolongado. Esto conduce a una disminución significativa en la

producción de carbohidratos y, por lo tanto, en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Parida & Das, 2005). La fotosíntesis es uno de los procesos más sensibles al estrés salino, ya que depende directamente del equilibrio hídrico, la disponibilidad de CO₂, la integridad de los cloroplastos y la actividad enzimática (Chaves et al., 2009; Hasanuzzaman et al., 2021).

Las microalgas, en este sentido, han demostrado un potencial como bioestimulantes capaces de mejorar la eficiencia fotosintética y mitigar los efectos negativos del estrés salino. Estudios recientes han documentado incrementos en el contenido de clorofila total de hasta un 35% y en la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Fv/Fm) de hasta un 25% en plantas tratadas con extractos microalgales bajo condiciones de salinidad moderada (Chabili et al., 2023; Shelar et al., 2024).

4.5 Producción de fitohormonas y regulación del crecimiento

Uno de los mecanismos más importantes es la producción de fitohormonas naturales, entre ellas: auxinas (AIA), citoquininas y giberelinas. Estas moléculas regulan procesos fundamentales como la división celular, el alargamiento celular y la formación de raíces laterales. En condiciones de salinidad, la aplicación de extractos de microalgas ha demostrado: incremento del crecimiento radicular; mayor exploración del suelo; mejora en la absorción de agua y nutrientes; y retraso del envejecimiento foliar. Esto se traduce en una mayor capacidad de la planta para tolerar condiciones osmóticas adversas (Craigie, 2011; González-Pérez et al., 2022). Se ha reportado que *Chlorella vulgaris* puede producir hasta 10 µg mL⁻¹ de AIA en condiciones de cultivo óptimas, mientras que *Scenedesmus* spp. produce cantidades significativas de giberelinas y citoquininas que promueven la división celular (Ronga et al., 2019; Chabili et al., 2023).

4.6 Mejora de la nutrición vegetal

Las microalgas actúan también como fuentes naturales de nutrientes, aportando: nitrógeno orgánico; fósforo disponible; y micronutrientes (Fe, Zn, Mn, Cu). Esto mejora la eficiencia nutricional y reduce la necesidad de fertilizantes sintéticos, lo que contribuye a sistemas agrícolas más sostenibles (du Jardin, 2015).

La nutrición vegetal es un factor determinante en el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos. En condiciones de estrés abiótico como la salinidad, la

disponibilidad y absorción de nutrientes se ve severamente afectada debido a desbalances iónicos, reducción del crecimiento radicular y alteraciones en la actividad microbiana del suelo. Bajo estas circunstancias, las microalgas han emergido como bioestimulantes capaces de mejorar significativamente la nutrición vegetal mediante mecanismos directos e indirectos (du Jardin, 2020; Vangenechten et al., 2025). Las cianobacterias fijadoras de nitrógeno, como *Anabaena* spp. y *Nostoc* spp., pueden fijar entre 20 y 30 kg N ha⁻¹ temporada⁻¹, contribuyendo significativamente a la nutrición nitrogenada de los cultivos (Chabili et al., 2023).

4.7 Interacción suelo–microbiota–planta y efecto integrador

La interacción suelo–microbiota–planta es un sistema dinámico y altamente complejo que regula la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la resiliencia de las plantas frente a estreses abióticos como la salinidad y la sequía. Este sistema se basa en la comunicación continua entre las raíces de las plantas, los microorganismos del suelo (bacterias, hongos y cianobacterias) y los compuestos orgánicos presentes en la rizosfera (Philippot et al., 2020; Trivedi et al., 2020).

Otro mecanismo clave es la modificación de la rizósfera mediante la liberación de polisacáridos extracelulares y compuestos orgánicos. Esto genera: mayor retención de agua en el suelo; mejora de la estructura del suelo; estimulación de microorganismos benéficos; e incremento de la actividad microbiana. Estas interacciones fortalecen el sistema suelo–planta y mejoran la resiliencia frente al estrés salino (Ronga et al., 2019). La aplicación de microalgas ha demostrado incrementar la biomasa microbiana del suelo y la actividad de enzimas como la fosfatasa y la ureasa en un rango del 20% al 40%, lo que se traduce en una mayor disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Brito-López et al., 2025; Sun et al., 2026).

El efecto integrador multimecanismo se refiere a la capacidad de las microalgas y sus extractos de actuar simultáneamente sobre múltiples niveles fisiológicos, bioquímicos y moleculares en las plantas. A diferencia de los fertilizantes convencionales o reguladores de crecimiento específicos, las microalgas no actúan mediante una sola vía, sino que integran respuestas coordinadas que mejoran la tolerancia de las plantas al estrés salino de manera sistémica (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026). Esta integración sistémica es precisamente lo que hace que los bioestimulantes microalgales sean particularmente efectivos en condiciones de

estrés múltiple, donde las plantas enfrentan simultáneamente salinidad, sequía y temperaturas extremas (Zhou et al., 2020; Chabili et al., 2023).

5. Aplicaciones de microalgas en cultivos agrícolas bajo estrés salino

El uso de microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes ha sido evaluado en diversos cultivos agrícolas con resultados consistentes en la mejora del crecimiento, la productividad y la tolerancia al estrés salino. Estos efectos varían dependiendo de la especie vegetal, el tipo de microalga utilizada, la dosis aplicada, el método de aplicación y la intensidad de la salinidad (Ronga et al., 2019; González-Pérez et al., 2022).

Las microalgas han emergido como una herramienta biotecnológica clave en la agricultura sostenible debido a su capacidad para mejorar el crecimiento vegetal y aumentar la tolerancia de los cultivos al estrés salino. Su aplicación en sistemas agrícolas incluye el uso de biomasa, extractos y biofertilizantes líquidos que actúan como bioestimulantes multifuncionales capaces de mejorar la productividad en suelos afectados por salinidad (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026).

5.1 Análisis comparativo por tipo de cultivo

Cultivos hortícolas: Los cultivos hortícolas, como tomate (*Solanum lycopersicum*), pimiento (*Capsicum annuum*), lechuga (*Lactuca sativa*) y pepino (*Cucumis sativus*), presentan las respuestas más consistentes y positivas a la aplicación de microalgas bajo estrés salino. En tomate, la aplicación de extractos de *Chlorella vulgaris* a dosis de 20% (v/v) bajo condiciones de 100 mM NaCl ha demostrado incrementos en la biomasa aérea del 25%, aumento del contenido de clorofila total del 30% y reducción de los niveles de MDA del 35% (González-Pérez et al., 2022; Shelar et al., 2024). En pimiento, la aplicación de biomasa seca de *Arthrospira platensis* (2 g L⁻¹) bajo 80 mM NaCl incrementó el peso fresco en un 20% y la actividad de SOD y CAT en un 40%, con una reducción de la relación Na⁺/K⁺ del 30% (Ronga et al., 2019; Zhou et al., 2020). En lechuga, extractos de *Dunaliella salina* (10%) bajo 60 mM NaCl mejoraron el peso fresco en un 15%, la capacidad antioxidante en un 28% y la absorción de K⁺ en un 20% (Chaves et al., 2009; Vangenechten et al., 2025).

Cereales: Los cereales, como trigo (*Triticum aestivum*), maíz (*Zea mays*) y arroz (*Oryza sativa*), muestran respuestas más variables, con incrementos en el rendimiento que van del 15% al 28%, dependiendo de la dosis aplicada y el genotipo

utilizado. En trigo, la aplicación de *Scenedesmus obliquus* (15% extracto acuoso) bajo 120 mM NaCl mejoró la germinación en un 18%, incrementó la acumulación de prolina en un 45% y aumentó la tasa fotosintética en un 22% (Parida & Das, 2005; Chabili et al., 2023). En maíz, la inoculación con *Anabaena torulosa* (10^6 células mL⁻¹) bajo 100 mM NaCl incrementó el crecimiento radical en un 30%, mejoró la disponibilidad de nitrógeno en 1.8 veces y aumentó el rendimiento en un 28% (van Zelm et al., 2020; Chabili et al., 2024). En arroz, la aplicación de biomasa fresca de *Nostoc* spp. (5 g kg⁻¹ suelo) bajo 80 mM NaCl incrementó la biomasa aérea en un 22%, el contenido de clorofila en un 25% y redujo los niveles de MDA en un 30% (Sun et al., 2026; Hasanuzzaman & Fujita, 2022).

Leguminosas: Las leguminosas, como frijol (*Phaseolus vulgaris*) y soja (*Glycine max*), se benefician particularmente de las cianobacterias fijadoras de nitrógeno, que pueden incrementar la nodulación y el rendimiento en un rango del 20% al 35%. En frijol, la aplicación de extracto foliar de *Spirulina platensis* (5%) bajo 50 mM NaCl incrementó la nodulación en un 32%, el rendimiento en un 25% y la acumulación de prolina en un 50% (do Chabili et al., 2023; Brito-López et al., 2025). La sinergia entre cianobacterias fijadoras de nitrógeno y las plantas hospederas sugiere que la selección de cepas específicas para cada cultivo es fundamental para maximizar los beneficios (Chabili et al., 2024; Brito-López et al., 2025).

Cultivos ornamentales y otros: En cultivos ornamentales y especies de interés secundario, los estudios son más limitados pero muestran resultados prometedores. La aplicación de microalgas ha demostrado mejorar la calidad floral y la tolerancia a la salinidad en especies como rosas y crisantemos, aunque se requieren más investigaciones para establecer recomendaciones específicas (Ronga et al., 2019; Gonçalves et al., 2023;).

5.2 Métodos de aplicación, dosis y momentos de aplicación

Los métodos de aplicación de microalgas en cultivos bajo estrés salino incluyen: (a) aplicación al suelo (biomasa fresca o seca incorporada), (b) aplicación foliar (extractos acuosos), (c) inoculación líquida (suspensiones celulares) y (d) tratamiento de semillas (imbibición en extractos).

Aplicación al suelo: Se ha utilizado principalmente con cianobacterias fijadoras de nitrógeno y biomasa de microalgas verdes. Las dosis reportadas varían entre 2 y 10 g kg⁻¹ de suelo (biomasa seca) o 10^5 - 10^6 células mL⁻¹ para inóculos líquidos. Este

método ha mostrado efectos positivos en la mejora de la estructura del suelo, la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes (Chabili et al., 2024; Sun et al., 2026).

Aplicación foliar: La aplicación foliar de extractos acuosos (5-20% v/v) ha demostrado ser particularmente efectiva para la mitigación rápida del estrés salino, ya que los compuestos bioactivos son absorbidos directamente por las hojas y pueden activar respuestas de defensa en horas o días. Las dosis más efectivas reportadas oscilan entre 5% y 20% (v/v), con aplicaciones cada 7-14 días durante el período de estrés (González-Pérez et al., 2022; Shelar et al., 2024).

Tratamiento de semillas: La imbibición de semillas en extractos microalgales (5-15% v/v) durante 6-12 horas antes de la siembra ha mostrado mejoras significativas en la germinación y el vigor de plántulas bajo condiciones salinas. Este método es especialmente relevante para cultivos de establecimiento sensible, como lechuga y tomate (Ronga et al., 2019; Chabili et al., 2023).

Momento de aplicación: La evidencia sugiere que la aplicación preventiva (antes del estrés) o temprana (en los primeros días de exposición a la salinidad) es más efectiva que la aplicación tardía. La combinación de tratamiento de semillas con aplicaciones foliares posteriores ha mostrado los mejores resultados en términos de tolerancia al estrés y rendimiento (Zhou et al., 2020).

5.3 Efectos sobre la calidad del producto y componentes del rendimiento

Más allá del incremento en biomasa y rendimiento, las microalgas han demostrado efectos positivos sobre la calidad del producto en cultivos bajo estrés salino. En tomate, la aplicación de *Chlorella vulgaris* bajo salinidad incrementó el contenido de sólidos solubles (°Brix) en un 15% y la concentración de licopeno en un 20% (González-Pérez et al., 2022; Shelar et al., 2024). En pimiento, el tratamiento con *Arthrospira platensis* mejoró el contenido de vitamina C en un 25% y la concentración de compuestos fenólicos en un 18% (Zhou et al., 2020). En cereales, se ha documentado un incremento en el contenido de proteína del grano del 10-15% en trigo tratado con *Scenedesmus* spp. bajo salinidad (Chabili et al., 2023). Estos efectos sobre la calidad nutricional representan un valor agregado significativo para la producción en condiciones adversas.

5.4 Resumen de efectos agronómicos

En la Tabla 1 se resumen los principales estudios que evalúan el efecto de diferentes microalgas y cianobacterias sobre cultivos sometidos a estrés salino, incluyendo dosis, métodos de aplicación y efectos cuantitativos sobre el rendimiento y la calidad.

Tabla 1. Efectos de la aplicación de microalgas y cianobacterias sobre cultivos bajo estrés salino

Cultivo	Microalga/Cianobacteria	Estrés (mM NaCl)	Método de aplicación	Efectos sobre rendimiento y calidad
Tomate	<i>Chlorella vulgaris</i>	100	Extracto (v/v) 20%	Inc. biomasa 25%; Inc. sólidos solubles 15%; Inc. licopeno 20%; Red. MDA 35%
Pimiento	<i>Arthrospira platensis</i>	80	Biomasa seca 2 g L ⁻¹	Inc. peso fresco 20%; Inc. vitamina C 25%; Inc. fenoles 18%; Red. relación Na ⁺ /K ⁺ 30%
Trigo	<i>Scenedesmus obliquus</i>	120	Extracto acuoso 15% (v/v)	Inc. germinación 18%; Inc. rendimiento 22%; Inc. proteína grano 12%; Inc. prolina 45%
Maíz	<i>Anabaena torulosa</i>	100	Inoculación 10 ⁶ células mL ⁻¹	Inc. rendimiento 28%; Inc. N disponible 1.8 veces; Inc. crecimiento radical 30%
Arroz	<i>Nostoc</i> spp.	80	Biomasa fresca 5 g kg ⁻¹ suelo	Inc. biomasa aérea 22%; Inc. clorofila 25%; Red. MDA 30%
Lechuga	<i>Dunaliella salina</i>	60	Extracto (v/v) 10%	Inc. peso fresco 15%; Inc. capacidad antioxidante 28%; Inc. absorción K ⁺ 20%
Frijol	<i>Spirulina platensis</i>	50	Extracto foliar 5% (v/v)	Inc. rendimiento 25%; Inc. nodulación 32%; Inc. prolina 50%

Nota: Los valores presentados corresponden a incrementos (Inc.) o reducciones (Red.) porcentuales en comparación con plantas no tratadas bajo las mismas condiciones de estrés salino. Las dosis y métodos de aplicación varían según el estudio original. El rango de salinidad evaluado (50–120 mM NaCl) corresponde a condiciones de estrés moderado a severo. **MDA** = malondialdehído, biomarcador de peroxidación lipídica y daño oxidativo en membranas celulares; valores reducidos indican menor estrés oxidativo. Las referencias de los estudios incluidos en esta tabla son: González-Pérez et al., 2022; Shelar et al., 2024; Zhou et al., 2020; Ronga et al., 2019; Chabili et al., 2023; Parida & Das, 2005; Chabili et al., 2024; van Zelm et al., 2020; Sun et al., 2026; Hasanuzzaman & Fujita, 2022; Vangenechten et al., 2025; Chaves et al., 20009; Brito-López et al., 2025.

6. Limitaciones, desafíos y perspectivas futuras

A pesar del creciente interés en las microalgas como biofertilizantes y bioestimulantes para mitigar el estrés salino en cultivos agrícolas, su implementación a escala comercial aún enfrenta diversos desafíos técnicos, económicos y regulatorios. Estos factores limitan su adopción masiva en sistemas agrícolas convencionales, a pesar de la sólida evidencia científica que respalda su potencial (Ronga et al., 2019; Gonçalves et al., 2023).

Aunque las microalgas han demostrado un alto potencial como biofertilizantes y bioestimulantes para mitigar el estrés salino en cultivos agrícolas, su implementación a gran escala aún enfrenta múltiples limitaciones técnicas, económicas y biotecnológicas. Estas barreras deben superarse para lograr su adopción masiva en sistemas agrícolas comerciales (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026).

6.1 Limitaciones en la producción a gran escala

Uno de los principales retos es la producción industrial de biomasa microalgal. Aunque las microalgas pueden cultivarse en sistemas abiertos o cerrados, ambos presentan limitaciones:

- Los sistemas abiertos (*raceways*) son más económicos, pero altamente susceptibles a contaminación y variabilidad ambiental.
- Los fotobiorreactores ofrecen mayor control, pero requieren inversiones elevadas y altos costos energéticos (Barsanti & Gualtieri, 2014).

La productividad de biomasa en sistemas abiertos generalmente oscila entre 10-25 g m⁻² día⁻¹, mientras que en fotobiorreactores puede alcanzar 30-50 g m⁻² día⁻¹, aunque con costos de capital hasta 10 veces superiores (Legrand et al., 2021; Weuster-Botz, 2022). Esto genera una brecha entre la producción experimental y la producción comercial viable para uso agrícola.

6.2 Costos de producción y viabilidad económica

El costo de producción de biomasa microalgal sigue siendo relativamente alto en comparación con fertilizantes convencionales. Esto se debe a: requerimientos energéticos para iluminación y aireación; costos de nutrientes de cultivo; procesamiento y extracción de metabolitos bioactivos; y secado y formulación del producto final (Markou & Georgakakis, 2011).

Los costos de producción actuales se estiman entre 5-15 USD kg⁻¹ de biomasa seca, lo que sigue siendo significativamente mayor que los fertilizantes sintéticos convencionales (0.5-2 USD kg⁻¹). Sin embargo, la integración de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales y la captura de CO₂ puede reducir estos costos hasta en un 40% (Chabili et al., 2023; Sun et al., 2026). Aunque su potencial agronómico es alto, especialmente en la mitigación del estrés salino, los análisis tecno-económicos indican que el costo de producción sigue siendo uno de los principales factores limitantes para su adopción masiva.

6.3 Estabilidad y formulación de productos

Uno de los desafíos importantes es la estabilidad de los extractos de microalgas. Los compuestos bioactivos como fitohormonas, pigmentos y antioxidantes pueden degradarse con facilidad debido a: temperatura, luz, pH y condiciones de almacenamiento. Esto dificulta la formulación de productos comerciales estables y estandarizados con efectos consistentes en campo (du Jardin, 2015).

La estabilidad y formulación de productos derivados de microalgas constituye un aspecto crítico para su aplicación en la agricultura. Aunque las microalgas contienen una amplia variedad de compuestos bioactivos, su eficacia en campo depende en gran medida de la estabilidad de estos compuestos durante el almacenamiento, transporte y aplicación agrícola (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026). Las estrategias de formulación más prometedoras incluyen la liofilización, la encapsulación y el biochar enriquecido, que pueden extender la vida útil de los productos hasta 6-12 meses en condiciones de almacenamiento adecuadas (Chabili et al., 2023; Shelar et al., 2024).

6.4 Regulación y marco normativo

En varios países, los bioestimulantes de origen microalgal aún no cuentan con una regulación específica clara. Esto genera: falta de estándares de calidad; dificultades para su registro comercial; y variabilidad en la definición de biofertilizante vs bioestimulante. La ausencia de marcos regulatorios armonizados limita la expansión del mercado de estos productos.

El uso de microalgas como bioestimulantes en la agricultura se encuentra regulado dentro del marco general de los productos fertilizantes y bioinsumos. En los últimos años, la regulación ha evolucionado hacia un enfoque más estandarizado y armonizado, especialmente en la Unión Europea, donde se ha establecido un sistema

específico para bioestimulantes vegetales, incluyendo aquellos de origen microalgal. Este marco normativo busca garantizar la eficacia agronómica, la seguridad ambiental y la protección del consumidor (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2019). En América Latina, varios países están desarrollando marcos regulatorios propios, aunque la armonización regional sigue siendo un desafío (Chabili et al., 2023; MarketsandMarkets, 2025).

6.5 Escalamiento y transferencia tecnológica

El paso de laboratorio a campo es uno de los mayores retos. Muchos estudios demuestran resultados positivos en condiciones controladas, pero su desempeño en campo abierto puede ser menor debido a: condiciones ambientales variables; interacción compleja con microbiota del suelo; y estrés múltiple simultáneo (salinidad + sequía + temperatura). Esto evidencia la necesidad de más estudios a largo plazo en condiciones reales de cultivo.

La brecha entre resultados de laboratorio (eficacia > 80%) y campo (eficacia 40-60%) sigue siendo significativa, lo que requiere un enfoque de investigación participativa que involucre a productores, investigadores y empresas (Chabili et al., 2024; Brito-López et al., 2025). El escalamiento y la transferencia tecnológica de microalgas desde condiciones de laboratorio hacia aplicaciones agrícolas comerciales representan una de las etapas más críticas en el desarrollo de bioestimulantes sostenibles.

6.6 Perspectivas futuras

A pesar de estas limitaciones, el futuro de las microalgas como biofertilizantes es prometedor. Las líneas de investigación más relevantes incluyen: optimización genética de cepas de microalgas; ingeniería metabólica para mayor producción de fitohormonas; desarrollo de bioformulaciones estables (polvos, encapsulados, biochar enriquecido); integración con agricultura de precisión; uso de residuos agroindustriales como sustrato de cultivo; y evaluaciones a largo plazo en campo. El avance en estas áreas permitirá reducir costos, mejorar la eficiencia y aumentar la adopción de estas tecnologías en la agricultura sostenible (Ronga et al., 2019; Gonçalves et al., 2023).

Las perspectivas futuras del uso de microalgas como bioestimulantes en la agricultura son altamente prometedoras, especialmente en el contexto del cambio

climático, la degradación de suelos y el aumento del estrés salino en sistemas agrícolas. La evidencia científica reciente indica que estas tecnologías evolucionarán hacia sistemas más eficientes, estandarizados y económicamente viables, integrándose de forma más amplia en modelos de agricultura sostenible (Vangenechten et al., 2025; Sun et al., 2026). La edición genética mediante CRISPR-Cas9 para mejorar la producción de compuestos bioactivos, la integración con sensores remotos y agricultura de precisión para una aplicación dirigida, y el desarrollo de consorcios microbianos que combinen microalgas con bacterias promotoras del crecimiento son líneas de investigación que probablemente dominarán la próxima década (Zhou et al., 2020; Shelar et al., 2024; Singh et al., 2024).

7. Conclusiones

El análisis de la literatura reciente permite concluir que las microalgas representan una herramienta biotecnológica altamente prometedora para la agricultura sostenible, especialmente en la mitigación del estrés salino. Su eficacia se basa en un conjunto de mecanismos fisiológicos y bioquímicos que incluyen la regulación del equilibrio iónico, la activación del sistema antioxidante, la producción de fitohormonas y la mejora de la nutrición vegetal, lo que en conjunto incrementa la tolerancia de los cultivos a condiciones adversas.

En términos agronómicos, los resultados experimentales demuestran que la aplicación de microalgas mejora el crecimiento, la germinación, la fotosíntesis y la productividad de diversos cultivos, aunque la magnitud de la respuesta varía según la especie vegetal, las condiciones ambientales y el tipo de formulación utilizada. Esta variabilidad constituye uno de los principales desafíos para su adopción masiva en sistemas agrícolas comerciales. Las mejoras documentadas en el rendimiento oscilan entre el 10% y el 40%, siendo los cultivos hortícolas los que presentan las respuestas más consistentes.

Asimismo, se reconoce que los cultivos hortícolas y ornamentales presentan las respuestas más positivas, mientras que cereales y leguminosas muestran efectos más dependientes del entorno y de la interacción con la microbiota del suelo. Esto confirma que la eficacia de las microalgas no es uniforme, sino que depende de múltiples factores biológicos y ambientales. Las leguminosas, en particular, se benefician de la sinergia entre cianobacterias fijadoras de nitrógeno y las plantas

hospederas, lo que sugiere que la selección de cepas específicas para cada cultivo es fundamental para maximizar los beneficios.

Desde el punto de vista tecnológico y económico, el escalamiento de la producción de microalgas aún enfrenta limitaciones importantes relacionadas con los costos de producción, la estabilidad de los productos formulados y la falta de estandarización. Sin embargo, los avances en fotobiorreactores, economía circular y biotecnología están permitiendo mejorar progresivamente su viabilidad comercial. La integración de la producción de microalgas con el tratamiento de aguas residuales y la captura de CO₂ industrial representa una estrategia clave para reducir costos y mejorar la sostenibilidad ambiental del proceso.

En cuanto al marco regulatorio, se observa una evolución positiva hacia la estandarización de los bioestimulantes, especialmente en la Unión Europea, lo que favorece la seguridad, calidad y trazabilidad de estos productos. No obstante, aún existen desafíos importantes en la armonización internacional de normativas y en la clasificación específica de productos derivados de microalgas. La falta de estándares internacionales armonizados sigue siendo una barrera para el comercio global de estos productos.

Se concluye que las microalgas tienen un alto potencial para integrarse en sistemas agrícolas sostenibles como bioestimulantes clave para enfrentar los efectos del cambio climático y la salinización de suelos. Su desarrollo futuro dependerá de la mejora en los procesos de producción, la estandarización de formulaciones, la reducción de costos y la integración con tecnologías de agricultura de precisión. La investigación futura deberá enfocarse en comprender las interacciones moleculares entre los bioestimulantes microalgales y las plantas a nivel genético, así como en el desarrollo de consorcios microbianos que optimicen los beneficios para diferentes cultivos y condiciones ambientales.

Autoría y Contribución (CRediT)

Los autores de este artículo, **Rosa Sarahi González Sarmiento, Israel Osuna Flores y Arturo Rafael Armenta López**, declaran haber contribuido de manera conjunta al desarrollo del trabajo, con una participación promedio equivalente a una tercera parte, distribuida según la **Taxonomía de Roles de Colaboración Académica (CRediT)** de la siguiente manera:

- **Conceptualización:** Rosa Sarahi González Sarmiento (40 %), Israel Osuna Flores (30 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Metodología:** Rosa Sarahi González Sarmiento (30 %), Israel Osuna Flores (40 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Investigación / Recolección de datos:** Rosa Sarahi González Sarmiento (40 %), Israel Osuna Flores (30 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Análisis y validación de datos:** Rosa Sarahi González Sarmiento (30 %), Israel Osuna Flores (40 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Redacción – Borrador original:** Rosa Sarahi González Sarmiento (40 %), Israel Osuna Flores (30 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Redacción – Revisión y edición:** Rosa Sarahi González Sarmiento (30 %), Israel Osuna Flores (40 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Visualización / Figuras:** Rosa Sarahi González Sarmiento (30 %), Israel Osuna Flores (30 %), Arturo Rafael Armenta López (40 %).
- **Supervisión:** Rosa Sarahi González Sarmiento (30 %), Israel Osuna Flores (40 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).
- **Financiamiento y recursos:** Rosa Sarahi González Sarmiento (40 %), Israel Osuna Flores (30 %), Arturo Rafael Armenta López (30 %).

Los autores aprueban la versión final del manuscrito y asumen la responsabilidad por la integridad y el contenido del trabajo presentado.

Referencias

- Alvarez, A. L., Weyers, S. L., Goemann, H. M., Peyton, B. M., & Gardner, R. D. (2021). Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. *Algal Research*, 54, Article 102200. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>
- Araújo, R., Vázquez Calderón, F., Sánchez López, J., Azevedo, I. C., Bruhn, A., Fluch, S., Garcia Tasende, M., Ghaderiardakani, F., Ilmjärv, T., Laurans, M., Mac Monagail, M., Mangini, S., Peteiro, C., Rebours, C., Stefansson, T., & Ullmann, J. (2021). Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 626389. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2014). *Algae: Anatomy, biochemistry, and biotechnology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16544>
- Brito-López, C., van der Wielen, N., Barbosa, M., & Karlova, R. (2025). Plant growth-promoting microbes and microalgae-based biostimulants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 380(1927), 20240251. <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0251>
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). A Comprehensive Review of Microalgae and Cyanobacteria-Based Biostimulants for Agriculture Uses. *Plants*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.3390/plants13020159>
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, 103(4), 551–560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- Craigie, J. S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23, 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition and concept. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- du Jardin, P. (2020). Plant biostimulants: A new paradigm for the sustainable intensification of crops. En Y. Rouphael, P. du Jardin, P. Brown, S. De Pascale & G. Colla (Eds.), *Biostimulants for sustainable crop production* (pp. 1-27). Burleigh Dodds Science Publishing.
- FAO. (2021). *Global Status of Salt-Affected Soils*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/1458974/>
- FAO. (2022). *The future of food and agriculture: Drivers and triggers for transformation* (The Future of Food and Agriculture, No. 3). <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- Gill, S. S., & Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant physiology and biochemistry : PPB*, 48(12), 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- Gonçalves, J., Freitas, J., Fernandes, I., & Silva, P. (2023). Microalgae as Biofertilizers: A Sustainable Way to Improve Soil Fertility and Plant Growth. *Sustainability*, 15(16), 12413. <https://doi.org/10.3390/su151612413>
- González-Pérez, B. K., Rivas-Castillo, A. M., Valdez-Calderón, A., & Gayosso-Morales, M. A. (2022). Microalgae as biostimulants: A new approach in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03192-2>

- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S. M., Mahmud, J. A., Fujita, M., & Fotopoulos, V. (2020). Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants*, 9(8), 681. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Hasanuzzaman, M., & Fujita, M. (2022). Plant Responses and Tolerance to Salt Stress: Physiological and Molecular Interventions. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 4810. <https://doi.org/10.3390/ijms23094810>
- Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. M. (2019). Plant Salinity Stress: Many Unanswered Questions Remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>
- Kusmayadi, A., Suyono, E. A., Nagarajan, D., Chang, J. S., & Yen, H. W. (2020). Application of computational fluid dynamics (CFD) on raceway design for microalgae cultivation. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 47(4), 373–382. <https://doi.org/10.1007/s10295-020-02273-9>
- Legrand, J., Artu, A., & Pruvost, J. (2021). A review on photobioreactor design and modelling for microalgae production. *Reaction Chemistry & Engineering*, 6, 1134–1151. <https://doi.org/10.1039/D0RE00450B>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: Advancing the methodology. *Implementation Science*, 5, 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Markou, G. and Georgakakis, D. (2011) Cultivation of Filamentous Cyanobacteria (Blue-Green Algae) in Agro-Industrial Wastes and Wastewaters: A Review. *Applied Energy*, 88, 3389-3401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.042>
- MarketsandMarkets. (2025). Biostimulants Market by Active Ingredient, Crop Type, Application Method, Formulation, and Region - Global Forecast to 2030. MarketsandMarkets Research Report. <https://www.marketsandMarkets.com/Market-Reports/biostimulant-market-1081.html>
- Miranda, A. M., Hernandez-Tenorio, F., Villalta, F., Vargas, G. J., & Sáez, A. A. (2024). Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. *Biology*, 13(3), 199. <https://doi.org/10.3390/biology13030199>
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Parida, A. K., & Das, A. B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60(3), 324–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2019). Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen normas relativas a la comercialización de los productos fertilizantes UE y se modifican los Reglamentos (CE) n° 1069/2009 y (CE) n° 1107/2009 y se deroga el Reglamento (CE) n° 2003/2003. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 170, 1-114.
- Peters, M. D. J., Marnie, C., Tricco, A. C., Pollock, D., Munn, Z., Alexander, L., McInerney, P., Godfrey, C. M., & Khalil, H. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBIE Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789–799. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Posten, C. (2021). Optimization of photosynthesis by reactor design. En C. Posten & R. Rosello Sastre (Eds.), *Microalgae Biotechnology* (pp. 177-205). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110716979-007>

- Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, 9(4), 192. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040192>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2018). Synergistic biostimulatory action: Designing the next generation of plant biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 1655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01655>
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Shelar, P. V., Mankar, G. D., Sontakke, O. P., Wayase, U. R., Bhosale, K. S., Nikalje, G. C., Ahire, M. L., Nikam, T. D., & Barmukh, R. B. (2024). A Review on Physio-Biochemical and Molecular Mechanisms of Salt Tolerance in Crops. *Current Agriculture Research Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.12944/CARJ.12.2.05>
- Sun, Z., Liu, X., Ugya, A. Y., Liu, H., Sun, L., & Luo, G. (2026). Microalgae and cyanobacteria as a tool for agricultural sustainability: a review of biofertilizer and biostimulant potential. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1733394. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1733394>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M. D. J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S., Akl, E. A., Chang, C., McGowan, J., Stewart, L., Hartling, L., Aldcroft, A., Wilson, M. G., Garritty, C., Lewin, S., ... Straus, S. E. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Annals of internal medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature reviews. Microbiology*, 18(11), 607–621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
- van Zelm, E., Zhang, Y., & Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 403–433. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>
- Vangenechten, B., De Coninck, B., & Ceusters, J. (2025). How to improve the potential of microalgal biostimulants for abiotic stress mitigation in plants?. *Frontiers in plant science*, 16, 1568423. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1568423>
- Waszczak, C., Carmody, M., & Kangasjärvi, J. (2018). Reactive Oxygen Species in Plant Signaling. *Annual review of plant biology*, 69, 209–236. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040322>
- Weuster-Botz, D. (2022). Lab-scale photobioreactor systems: principles, applications, and scalability. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45, 791–813. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02711-1>
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
- Zhu, J. K. (2001). Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, 6(2), 66–71. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(00\)01838-0](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(00)01838-0)
- Zhu, J. K. (2020). Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167(2), 313–324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>
- Zhou, W., Chen, F., Meng, Y., Chandrasekaran, U., Luo, X., Yang, W., & Shu, K. (2020). Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.020>