

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Uso de bioestimulantes para mitigar el estrés salino en plantas

Use of biostimulants to mitigate salt stress in plants

Authors/Autores: Valdovinos-Gálvez, Y.G., Hernández-Herrera, R.M., Velasco-Ramírez, A.P., Velasco-Ramírez, A., Palmeros-Suárez, P.A.

ID: e2166

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2166>

Received/Fecha de recepción: January 24th 2026

Accepted /Fecha de aceptación: July 09th 2026

Available online/Fecha de publicación: September 11th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Valdovinos-Gálvez, Y.G., Hernández-Herrera, R.M., Velasco-Ramírez, A.P., Velasco-Ramírez, A., Palmeros-Suárez, P.A. (2026). Use of biostimulants to mitigate salt stress in plants. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2166. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2166>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Uso de bioestimulantes para mitigar el estrés salino en plantas

Use of biostimulants to mitigate salt stress in plants

Valdovinos-Gálvez, Y.G.¹(<http://orcid.org/0009-0004-3984-0282>), Hernández-Herrera, R.M.²(<http://orcid.org/0000-0002-8753-3138>), Velasco-Ramírez, A.P.¹(<http://orcid.org/0000-0002-7113-1863>), Velasco-Ramírez, A.¹(<http://orcid.org/0000-0002-3828-8789>), Palmeros-Suárez, P.A.^{1*}(<http://orcid.org/0000-0002-5629-5990>)

¹Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA): Departamento de Producción Agrícola. Universidad de Guadalajara. Cam. Ramón Padilla Sánchez, 2100, 44600, Zapopan, Jalisco, México.

² Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA): Departamento de Botánica y Zoología. Universidad de Guadalajara. Cam. Ramón Padilla Sánchez, 2100, 44600, Zapopan, Jalisco, México

*Corresponding Author:

Paola Andrea Palmeros Suárez. Departamento de Producción Agrícola. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA). Universidad de Guadalajara. Cam. Ramón Padilla Sánchez, 2100, 44600, Zapopan, Jalisco, México. Email: paola.palmeros@academicos.udg.mx

RESUMEN

El estrés abiótico derivado del cambio climático constituye una amenaza crítica para la seguridad alimentaria a nivel global. Factores como la sequía, la salinidad y las temperaturas extremas alteran procesos fisiológicos esenciales en las plantas, lo que reduce el crecimiento y la productividad. En particular, la salinidad es responsable de aproximadamente el 20 % de las pérdidas del rendimiento en los cultivos, debido a la alteración del equilibrio hídrico y nutricional de las plantas. Ante este escenario, los bioestimulantes de origen natural han surgido como una alternativa sostenible para mejorar la tolerancia de las plantas a condiciones adversas; como los extractos obtenidos de algas marinas y de plantas terrestres, que contienen compuestos bioactivos capaces de activar algunos mecanismos de defensa vegetal ocasionando la estimulación de los sistemas antioxidantes, la regulación estomática, acumulación de osmolitos y mejora en la eficiencia del uso del agua. Adicionalmente, la aplicación de bioestimulantes ha mostrado efectos positivos sobre el crecimiento y la productividad de diversos cultivos hortícolas, frutales y ornamentales, posicionándose como una estrategia prometedora para mantener la productividad agrícola y contribuir a la resiliencia de los sistemas productivos ante condiciones ambientales adversas.

PALABRAS CLAVE:

estrés abiótico, salinidad, extractos de algas, extractos vegetales.

ABSTRACT

Abiotic stress from climate change poses a critical threat to global food security. Factors such as drought, salinity, and extreme temperatures can disrupt essential plant physiological processes, reducing growth and productivity. In particular, salinity accounts for approximately 20 % of crop yield losses by disrupting plant water and nutrient balance. In this context, natural biostimulants have emerged as a sustainable alternative to enhance plant tolerance to adverse conditions. Examples include extracts from seaweed and terrestrial plants, which contain bioactive compounds that activate

specific plant defense mechanisms. These compounds stimulate antioxidant systems, regulate stomatal function, promote osmolyte accumulation, and improve water-use efficiency. Additionally, biostimulant applications have shown positive effects on the growth and productivity of various horticultural, fruit, and ornamental crops, indicating a promising strategy for maintaining agricultural productivity and enhancing the resilience of production systems under adverse environmental conditions.

KEYWORDS:

Abiotic stress, salinity, seaweed extracts, botanical extracts.

Introducción

En los sistemas agrícolas, las plantas están expuestas de forma constante a diversos factores de estrés que limitan su crecimiento, desarrollo y productividad. Estos factores se clasifican en bióticos, como plagas y enfermedades, y abióticos, asociados a condiciones ambientales adversas. Entre estos últimos, la salinidad del suelo y del agua de riego constituye una de las principales restricciones para la producción agrícola a nivel global, debido a su impacto negativo sobre los procesos fisiológicos y metabólicos de las plantas (Munns & Tester, 2008; Shrivastava & Kumar, 2015).

El cambio climático ha intensificado este problema al modificar los patrones de precipitación, incrementar la frecuencia e intensidad de las sequías y favorecer la acumulación de sales solubles en los suelos agrícolas, particularmente en aquellos bajo riego. Se estima que hasta el 70 % de las pérdidas en el rendimiento de los cultivos están asociadas a factores de estrés abiótico, de las cuales aproximadamente el 20 % se atribuyen directamente a la salinidad (Nezamdoost *et al.*, 2023).

En México, más de 600 000 ha presentan algún grado de salinización, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde el uso continuo de agua de riego con alta concentración de sales acelera el deterioro de la calidad del suelo (CONAGUA, 2018; Hernández-Herrera *et al.*, 2022).

Además de reducir la productividad agrícola, la salinidad contribuye a la degradación de los ecosistemas al disminuir la fertilidad natural del suelo, afectar la biodiversidad vegetal y, en casos severos, provocar la pérdida total de la cobertura vegetal (FAO, 2021). En este contexto, comprender los procesos que originan la salinización y los mecanismos mediante los cuales afecta a las plantas resulta fundamental para el diseño e implementación de estrategias de manejo sustentable.

Estrés por salinidad

El estrés salino se considera uno de los estresores abióticos más estudiados y, según proyecciones recientes de la FAO (2021), la tendencia continua a la salinización del suelo podría inutilizar el 50 % de las tierras cultivables para 2050 (Atta *et al.*, 2023). Factores como la expansión de áreas de regadío mediante grandes proyectos hidrológicos y el manejo irracional de los recursos hídricos han acelerado este proceso (Lamz Piedra & González Cepero, 2013; Padilla, 2017).

En este contexto, resulta fundamental comprender la naturaleza de la salinidad y los mecanismos mediante los cuales afecta la producción agrícola, ya que se trata de un fenómeno asociado a la acumulación excesiva de sales solubles en el suelo o en el agua. Esta condición representa una limitante importante para la producción agrícola y se evalúa comúnmente mediante la conductividad eléctrica (EC), que refleja la concentración de sales disueltas. En general, valores superiores a 2 mS/cm pueden resultar perjudiciales para el desarrollo de la mayoría de los cultivos al afectar su capacidad de absorción de agua y nutrientes (Machado & Serralheiro, 2017). Asimismo, Chen *et al.* (2021) subrayan que la salinidad interfiere con mecanismos fisiológicos clave y con la cinética proteica, lo cual deriva en una marcada disrupción de las rutas metabólicas y la integridad funcional de la planta.

Según su composición química, los suelos afectados por la salinidad se clasifican en tres tipos principales. El primero corresponde a los suelos salinos, que se caracterizan por presentar elevadas concentraciones de sales solubles, principalmente cloruros y sulfatos de sodio, calcio y magnesio. Se considera que existe una alta concentración de sales cuando la conductividad eléctrica (EC) del

extracto de saturación del suelo es igual o superior a 4 dS/m, umbral a partir del cual se observa una interferencia significativa en el crecimiento de la mayoría de los cultivos, debido principalmente al estrés osmótico que limita la absorción de agua por las plantas. El segundo tipo corresponde a los suelos sódicos o alcalinos, los cuales se caracterizan por un alto contenido de sodio intercambiable, generalmente asociado a carbonatos y bicarbonatos de sodio. Estos suelos presentan un porcentaje de sodio intercambiable (ESP) superior al 15 % y un pH elevado (usualmente > 8.5), condiciones que provocan la dispersión de las partículas del suelo, deteriorando su estructura, reduciendo la permeabilidad y limitando la aireación. Por su parte, el tercer tipo corresponde a los suelos salino-sódicos, los cuales combinan altas concentraciones de sales solubles ($EC \geq 4$ dS/m) con un elevado contenido de sodio intercambiable ($ESP > 15$ %). Esta combinación genera efectos tanto osmóticos como estructurales adversos, por lo que es considerada entre los más restrictivos para el crecimiento vegetal (Argentel-Martínez et al., 2024; Lamz Piedra & González Cepero, 2013, 2013).

Las causas de la salinización pueden ser naturales, como la cercanía al mar o determinadas condiciones geológicas; sin embargo, en la mayoría de los casos están asociadas a la actividad humana. El uso de agua de riego con elevada concentración de sales, junto con un manejo inadecuado del suelo (por ejemplo, un drenaje deficiente, labranza inadecuada, compactación del suelo o falta de cobertura) favorece su acumulación progresiva. Durante el proceso de evapotranspiración, el agua se pierde, pero las sales permanecen, intensificando el problema.

En México, donde cerca del 60 % de la superficie agrícola bajo riego se localiza en zonas áridas y semiáridas, la salinidad representa un desafío significativo. En el campo, este fenómeno se traduce en menores rendimientos, reducción de la calidad de las cosechas e incluso en el abandono de áreas productivas (Argentel-Martínez et al., 2024; Padilla, 2017).

Efecto del estrés salino en las plantas

La salinidad del suelo provoca una serie de alteraciones fisiológicas que afectan negativamente el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de las plantas. Estos efectos se manifiestan de forma secuencial y responden en las siguientes fases: una fase osmótica, que inhibe el crecimiento, una fase iónica, que ocasiona la senescencia de las hojas y aquella que genere un estrés oxidativo debido a un incremento en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Munns & Tester, 2008; Sumithra et al., 2006).

El primero de estos mecanismos, se manifiesta cuando el suelo presenta una alta concentración de sales, lo que provoca una disminución del potencial osmótico y en consecuencia, dificulta la absorción de agua por las raíces. Esta condición induce en las plantas un estado de estrés hídrico, que se manifiesta en síntomas como marchitez, reducción del crecimiento y disminución del tamaño de los órganos vegetales (Parida & Das, 2005). Asimismo, bajo exposición prolongada a condiciones salinas, se favorece además la acumulación de iones como sodio (Na^+) y cloruro (Cl^-) en los tejidos vegetales, alcanzando niveles tóxicos. Esta acumulación altera la homeostasis iónica y compromete procesos metabólicos esenciales, incluyendo la fotosíntesis y la respiración. Asimismo, el cierre estomático inducido como mecanismo de defensa reduce la transpiración y limita la entrada de CO_2 , lo que repercute negativamente en la producción de biomasa (Isayenkov et al., 2019).

Adicionalmente, la salinidad favorece la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), moléculas que causan daño oxidativo en proteínas, lípidos y membranas celulares, acelerando procesos de senescencia y muerte celular (Hasanuzzaman et al., 2020).

En conjunto, estos mecanismos explican la disminución en la altura de las plantas, así como en el desarrollo de hojas y raíces, la floración y en última instancia, el rendimiento de los cultivos bajo condiciones de salinidad (Hernández-Herrera, 2022) (Figura 1).

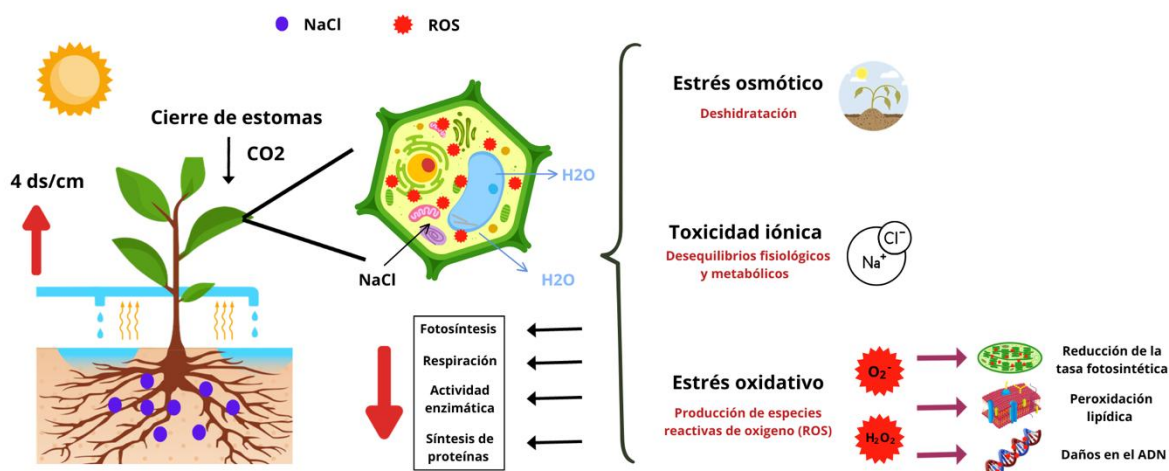


Figura 1. La salinidad induce estrés osmótico, toxicidad iónica y estrés oxidativo en las plantas, afectando su crecimiento y desarrollo fisiológico.

Dada la complejidad de los efectos fisiológicos, bioquímicos y moleculares inducidos por la salinidad, su impacto sobre los cultivos es inherentemente multifactorial, lo que dificulta su mitigación mediante una única estrategia. En respuesta a este desafío, se han desarrollado diversas aproximaciones orientadas tanto a reducir el daño como a fortalecer la capacidad adaptativa de las plantas frente a este tipo de estrés. Entre ellas se incluyen el mejoramiento genético para la obtención de variedades tolerantes, la optimización de las prácticas de riego, el manejo del suelo y el uso racional de fertilizantes (Machado & Serralheiro, 2017; Minhas *et al.*, 2020; Zörb *et al.*, 2019). No obstante, muchas de estas estrategias presentan limitaciones técnicas, económicas o ambientales, particularmente en regiones áridas y semiáridas. En este contexto, el uso de bioestimulantes ha emergido como una alternativa complementaria y sostenible, con creciente interés por su potencial para mejorar la tolerancia de las plantas al estrés salino (Mannino, 2023; Meddich, 2022).

Bioestimulantes

Los bioestimulantes se definen como microorganismos, sustancias de origen biológico o derivados sintéticos que estimulan los procesos naturales para mejorar la absorción de nutrientes, la eficiencia, la tolerancia al estrés abiótico y/o las características de calidad de los cultivos, independientemente de su contenido nutricional (Arinaitwe *et al.*, 2025).

La clasificación de los bioestimulantes no se fundamenta estrictamente en su composición química, sino principalmente en su origen biológico. En este sentido, la clasificación técnica actual incluye diversas categorías, entre las que destacan las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos), los extractos de algas (principalmente de macroalgas pardas), los extractos botánicos derivados de distintas especies vegetales, los hidrolizados de proteínas (aminoácidos y péptidos),

los microorganismos benéficos, como hongos micorrícicos arbusculares y rizobacterias promotoras del crecimiento, así como compuestos inorgánicos, como el silicio, y biopolímeros como el quitosano (García-Morales *et al.*, 2021; Meddich, 2022). En el contexto del estrés salino, algunas de estas categorías han demostrado mayor relevancia debido a su composición y mecanismos de acción específicos.

Entre ellos, los extractos de algas destacan por su composición bioquímica altamente especializada y su eficacia documentada en condiciones salinas (Tabla 1). Estos se obtienen principalmente de macroalgas como *Ascophyllum nodosum*, *Eisenia arborea* y *Macrocystis pyrifera*, y presentan una compleja matriz de polisacáridos sulfatados (alginatos, laminarinas y fucoidanos), fitohormonas, aminoácidos, polifenoles, betaínas y osmolitos como el manitol. Dichos compuestos actúan como elicitores moleculares que modulan la expresión de genes asociados al transporte iónico, favoreciendo la exclusión de sodio a nivel citosólico y contribuyendo al mantenimiento de la turgencia celular mediante mecanismos de ajuste osmótico (Aida *et al.*, 2025; Di Filippo-Herrera *et al.*, 2022). Asimismo, su aplicación exógena se ha relacionado con una mejora en la eficiencia del fotosistema II y con la activación de sistemas antioxidantes involucrados en la detoxificación de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que se traduce en un mejor desempeño productivo de cultivos hortícolas y frutales bajo condiciones de salinidad (Shukla *et al.*, 2019; Rabhi *et al.*, 2025).

En contraste, los bioestimulantes de origen botánico se caracterizan por su alta diversidad química, ya que provienen de distintos tejidos vegetales (hojas, semillas, raíces o residuos), lo que les confiere una composición rica en fenoles, flavonoides, aminoácidos, azúcares solubles y metabolitos secundarios específicos de cada especie. Aunque esta heterogeneidad implica una mayor variabilidad en su composición (Meddich, 2022), también representa una ventaja en términos de potencial bioactivo. En este contexto, especies como *Moringa oleífera* y *Verbena sphaerocephala* han emergido como fuentes prometedoras, debido a su capacidad para modular la síntesis de metabolitos secundarios y fortalecer el sistema antioxidante vegetal. Por ejemplo, en tomate (*Solanum lycopersicum*), la aplicación foliar de extracto de *M. oleífera* induce una respuesta defensiva significativa, incrementando la actividad de enzimas como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), además de promover la acumulación de prolina y preservar la estabilidad de las membranas celulares (Bello & Ahmed, 2024).

La eficacia de estos extractos botánicos ha sido recientemente ampliamente respaldada por estudios experimentales en diversos sistemas agrícolas (Tabla 2). Su versatilidad permite su aplicación directa como tratamiento de semillas, mediante aspersión foliar o irrigación radicular (Feng *et al.*, 2025). En este sentido, se ha documentado su uso en cultivos como trigo (*Triticum aestivum*), maíz (*Zea mays*) y calabaza (*Cucurbita moschata*) mediante extracto de *M. oleífera* (Abd El-Mageed *et al.*, 2017; Farooq *et al.*, 2017; Bhowmick *et al.*, 2024), así como en quinua (*Chenopodium quinoa*) con *Azadirachta indica* (Naz *et al.*, 2022) y en arroz (*Oryza sativa*) con *Casuarina equisetifolia* (Salsinha *et al.*, 2023). En conjunto, estos tratamientos contribuyen a reducir la peroxidación lipídica y la toxicidad iónica, al tiempo que favorecen la homeostasis celular y el vigor vegetal en diversas especies, incluidas *Cucumis sativus* y *Pelargonium* spp. (Ali *et al.*, 2018; Hernández-Pérez *et al.*, 2025a).

En las tablas 1 y 2 se muestran ejemplos de la aplicación de bioestimulantes algales y botánicos en cultivos de interés agronómico.

Tabla 1. Aplicación de bioestimulantes algales en cultivos de interés agronómico.

Extracto (especie/compuesto)	Cultivo	Respuesta de la planta (genes/proteínas/vías metabólicas implicadas)	Referencia
<i>Macrocystis pyrifera</i> <i>Eisenia arborea</i> <i>Sargassum</i> spp.	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Mejoran el desarrollo y rendimiento del cultivo y en la calidad nutraceutica del fruto. redujeron el daño oxidativo mediante la activación de enzimas	Carmona-Rodríguez, (2019)

		antioxidantes (PAL), cuantificación de peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂).	
<i>Padina gymnospora</i>	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Los extractos de aumentaron la expresión de genes que responden al estrés salino, mejoraron el equilibrio K ⁺ /Na ⁺ y redujeron el daño oxidativo mediante la activación de enzimas antioxidantes (SOD, CAT).	Hernández-Herrera <i>et al.</i> (2022, 2024)
<i>Eisenia arborea</i> <i>Sargassum horridum</i>	Frijol mungo (<i>Vigna radiata</i>)	Aceleran la germinación y el desarrollo temprano de las plántulas.	Di Filippo-Herrera <i>et al.</i> (2022)
<i>Eckonia maxima</i>	Calabacín (<i>Cucurbita pepo</i>)	Aumento de la biomasa de los brotes, del contenido de clorofila y del estado nutricional.	Rouphael <i>et al.</i> (2017)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i> var. 'New Red Fire')	Aumento del peso fresco de la planta, incremento del contenido de prolina libre, sólidos solubles, pigmentos fotosintéticos, antocianinas, vitamina C, fenoles, flavonoides y la actividad antioxidante.	Nezamdoost <i>et al.</i> (2023)
<i>Ascophyllum nodosum</i>	Aguacate (<i>Persea americana</i>)	Mayor concentración de calcio (Ca) y potasio (K) en las hojas.	Bonomelli <i>et al.</i> (2018)
<i>Fucus spiralis</i>	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Mejora de la germinación de las semillas, los parámetros de crecimiento y la actividad de las enzimas antioxidantes.	Chernane <i>et al.</i> (2015)
<i>Lessonia nigrescens</i>	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Aumento del crecimiento de las plantas, aumento del contenido de clorofila y mejora de las actividades antioxidantes. TaHKT2, TaSOS1 y TaNHX2.	Zou <i>et al.</i> (2019)
<i>Padina antrillarum</i>	Rosas (<i>Rosa</i> sp.)	Incremento la altura de la planta, número de ramas, área foliar y cantidad de flores, reduciendo además los días para la floración.	Kularathne <i>et al.</i> (2021)
<i>Kappaphycus alvarezii</i>	Tabaco (<i>Nicotiana tabacum</i>)	Aumento de la fotosíntesis, la transferencia de electrones y una mayor expresión del gen antiportador de Na ⁺ /H ⁺ de defensa contra el estrés.	Kumari <i>et al.</i> (2022)
<i>Dictyota dichotoma</i>	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Mejora de la germinación de las semillas.	El-Katony <i>et al.</i> (2021)
<i>Grateloupia filicina</i>	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Aumento del potencial de germinación, longitud de la raíz y del tallo. Aumento del contenido de prolina, SOD y POD. Vía antioxidante.	Liu <i>et al.</i> (2019)
<i>S. muticum</i> <i>Jania Rubens</i>	Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i>)	Aumento de clorofila a, clorofila b y carotenoides. Aumento de las actividades de SOD, CAT, POD y APX. SnRK (quinasas no fermentadoras de sacarosa).	Latef <i>et al.</i> (2017)

Tabla 2. Aplicación de bioestimulantes botánicos en cultivos de interés agronómico.

Extracto (especie/compuesto)	Cultivo	Respuesta de la planta (genes/proteínas/vías metabólicas implicadas)	Referencia
<i>Verbesina sphaerocephala</i>	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	El extracto de hojas aumentó el rendimiento, el número de frutos y los sólidos solubles (°Brix).	Hernández-Pérez <i>et al.</i> (2025a)
<i>Moringa oleifera</i>	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	El extracto de potenció la actividad de las enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD), mejoró la estabilidad de la membrana, el estado hídrico y la acumulación de prolina.	Bello & Ahmed, (2024)
<i>V. sphaerocephala</i>	Frijol mungo (<i>Vigna radiata</i>)	El extracto incremento el crecimiento de las raíces y los brotes, aumentando la biomasa fresca y seca.	Hernández-Pérez <i>et al.</i> (2025b)
<i>V. sphaerocephala</i>	Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	La aplicación del extracto de promovió el desarrollo floral y redujo significativamente el daño por nematodos (<i>Meloidogyne incognita</i>).	Velasco-Ramírez <i>et al.</i> (2021)
<i>Beta vulgaris</i> <i>Opuntia ficus-indica</i> <i>Moringa oleifera</i>	Chile (<i>Capsicum sp.</i>)	La aplicación de extractos botánicos mediante la técnica de acondicionamiento de semillas tuvo un efecto significativo en la mitigación del estrés por salinidad y la inhibición de la germinación en tres genotipos de Chile.	Arraf <i>et al.</i> (2025)
<i>Cenchrus echinatus</i>	Chile (<i>C. annuum</i>)	Mejoró el porcentaje de germinación de semillas y la longitud de la radícula y el hipocótilo de plántulas de Chile.	Huez-López <i>et al.</i> (2008)
<i>Moringa oleifera</i>	Geranio (<i>Pelargonium graveolens</i>)	La aplicación foliar de extracto de hoja de Moringa indujo la síntesis de aceites esenciales y mejoró los parámetros fisiológicos y bioquímicos del cultivo.	Ali <i>et al.</i> (2018)
<i>Azadirachta indica</i> , aceite de <i>Ricinus communis</i> y <i>Polygonum orientale</i>	Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	El uso de extractos de semillas de Neem, aceite de ricino y <i>Polygonum orientale</i> mostró una supresión efectiva a plagas de insectos, resultando en un aumento del rendimiento del cultivo bajo diferentes condiciones climáticas.	Ahmed <i>et al.</i> (2010)
<i>Moringa oleifera</i>	<i>Arabidopsis</i> (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	Los extractos de hojas de <i>M. oleifera</i> inducen tolerancia al estrés salino en semillas de <i>Arabidopsis</i> .	Brazales-Cevallos <i>et al.</i> (2022)

En conjunto, estos hallazgos evidencian la importancia de comprender los mecanismos fisiológicos subyacentes que explican los efectos observados. Desde esta perspectiva, los bioestimulantes pueden aplicarse directamente a las semillas, mediante aspersión foliar o directos al suelo, actuando como moduladores de procesos fisiológicos clave en las plantas. Su acción se basa en la activación de mecanismos internos que promueven el crecimiento, optimizan la absorción y utilización de nutrientes, y fortalecen las respuestas de adaptación frente a condiciones ambientales adversas (Boutahiri *et al.*, 2024). En este sentido, a diferencia de los fertilizantes convencionales, los bioestimulantes no constituyen una fuente directa de nutrientes, sino que actúan regulando el metabolismo vegetal y mejorando la resiliencia fisiológica de las plantas frente a condiciones de estrés, como la salinidad (du Jardin, 2015; López-Serrano *et al.*, 2026).

Mecanismos para combatir el estrés salino

En condiciones de salinidad, los bioestimulantes algales han demostrado una acción consistente en cultivos hortícolas, frutales y ornamentales, atribuida a su compleja composición de metabolitos primarios y secundarios. Su mecanismo de acción se basa, en primer lugar, en la regulación de la homeostasis iónica mediante la modulación de la expresión de genes transportadores. En particular, inducen la activación de la vía SOS (*Salt Overly Sensitive*), promoviendo la regulación positiva del transportador SOS1 en la membrana plasmática para la exclusión de Na^+ , así como de los antiportadores NHX responsables del secuestro vacuolar de este ión. Este proceso contribuye a restablecer el equilibrio iónico K^+/Na^+ y a reducir la toxicidad iónica en los tejidos vegetales.

De manera complementaria, estos extractos favorecen el ajuste osmótico al estimular la síntesis de osmolitos compatibles, como prolina y manitol, así como el incremento de sólidos solubles totales, lo que permite mantener la turgencia celular y optimizar la eficiencia del fotosistema II (Shukla *et al.*, 2019; Rabhi *et al.*, 2025; Nezamdoost *et al.*, 2023; Aida *et al.*, 2025). Paralelamente, potencian el sistema antioxidante vegetal mediante el aumento de la actividad de enzimas clave, como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), junto con la acumulación de compuestos no enzimáticos, incluyendo vitamina C, fenoles, flavonoides y antocianinas. Esta respuesta integral contribuye a la detoxificación eficiente de las especies reactivas de oxígeno (ROS) y a la protección de los pigmentos fotosintéticos frente al daño oxidativo (Nezamdoost *et al.*, 2023; Boutahiri *et al.*, 2024).

Adicionalmente, los polisacáridos presentes en estos extractos, como los alginatos, favorecen la quelación de micronutrientes y mejoran la arquitectura del sistema radical, optimizando la absorción de nutrientes (Rabhi *et al.*, 2025). A nivel molecular, ciertos metabolitos actúan como elicitores que mimetizan patrones moleculares asociados a patógenos (PAMPs), activando rutas de señalización relacionadas con la resistencia sistémica inducida (ISR) y adquirida (SAR), así como la expresión de genes asociados a la tolerancia al estrés (Aida *et al.*, 2025; Rabhi *et al.*, 2025). En conjunto, estos mecanismos confieren a los bioestimulantes algales un papel clave en la mitigación del estrés salino y en la mejora del desempeño fisiológico de las plantas bajo condiciones adversas.

Por otra parte, los bioestimulantes de origen botánico han mostrado un alto potencial para mitigar el estrés salino, principalmente mediante la estimulación de metabolitos antioxidantes endógenos, la modulación de respuestas hormonales y la activación de mecanismos de defensa sistémicos. No obstante, a diferencia de los extractos algales, sus efectos suelen ser más variables y dependientes de factores como la especie vegetal de origen, el método de extracción, el cultivo tratado y la intensidad del estrés salino, lo que se atribuye a la complejidad y heterogeneidad de su composición (Boutahiri *et al.*, 2024; Meddich, 2022).

En términos fisiológicos, estos extractos contribuyen a la tolerancia salina mediante la regulación de la homeostasis iónica, favoreciendo la integridad de la membrana plasmática y reduciendo la fuga de electrolitos, lo que limita el daño por peroxidación lipídica inducido por la toxicidad de Na^+ (Mannino, 2023; Meddich, 2022). Este efecto se encuentra asociado, a nivel molecular, con la modulación de vías de señalización dependientes de calcio (Ca^{2+}) y la activación de la vía SOS (*Salt Overly Sensitive*), en la cual sensores como SOS3 y SCABP8 activan la cinasa SOS2, que a su vez estimula al antiportador SOS1 en la membrana plasmática, promoviendo la extrusión de Na^+ y la restauración del equilibrio iónico K^+/Na^+ (Zhu, 2016).

De manera complementaria, los bioestimulantes botánicos favorecen el ajuste osmótico mediante la aportación directa de solutos compatibles, como prolina, glicina-betaína y azúcares solubles. Estos compuestos permiten regular el potencial hídrico celular sin interferir con el metabolismo, lo que constituye una estrategia energéticamente eficiente para la planta bajo condiciones de estrés (Boutahiri *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2022).

Un rasgo distintivo de estos extractos es su elevada capacidad antioxidante, derivada tanto de la presencia de compuestos bioactivos exógenos, como carotenoides, fenoles y flavonoides, que actúan como captadores directos de especies reactivas de oxígeno (ROS), como de su capacidad para inducir respuestas antioxidantes endógenas. En este sentido, se ha documentado que extractos como los de *Moringa oleifera* incrementan la actividad de enzimas clave, tales como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasa (POD), reforzando los sistemas de detoxificación y

protegiendo la integridad estructural de las membranas celulares (Bello & Ahmed, 2024; Meddich, 2022).

En conjunto, estos mecanismos evidencian una reprogramación metabólica compleja que permite a las plantas enfrentar el estrés salino mediante la integración coordinada de respuestas iónicas, osmóticas y antioxidantes, así como la activación de rutas de señalización asociadas a la tolerancia al estrés.

Si bien tanto los extractos algales como los botánicos contribuyen a mejorar la resiliencia de las plantas bajo condiciones de salinidad, lo hacen a través de mecanismos diferenciados. Estas diferencias se deben principalmente a su composición bioquímica particular y a las rutas específicas que activan para mitigar los efectos del estrés osmótico e iónico (Tabla 3).

Tabla 3. Tabla comparativa de los mecanismos que utilizan los bioestimulantes algales y botánicos para mitigar los efectos de la salinidad.

Característica	Bioestimulantes algales	Bioestimulantes botánicos
Ajuste osmótico	Utilizan el manitol y la estimulación de la síntesis endógena de prolina (ej. <i>Ulva lactuca</i> puede aumentar 7 veces el contenido de prolina) (Aida <i>et al.</i> , 2025; Rabhi <i>et al.</i> , 2025).	Aportan directamente solutos compatibles como prolina y glicina betaína, ahorrando energía metabólica a la planta (Boutahiri <i>et al.</i> , 2024; Meddich, 2022).
Homeostasis iónica	Actúan como elicitores moleculares que regulan positivamente la expresión de genes de transporte iónico, como los antiportadores NHX1 y SOS1, facilitando la exclusión del Na ⁺ (Aida <i>et al.</i> , 2025; Rabhi <i>et al.</i> , 2025).	Se enfocan en mantener la integridad de la membrana plasmática para evitar la fuga de electrolitos y reducir el daño por peroxidación lipídica (Mannino, 2023; Meddich, 2022).
Defensa antioxidante	Estimulan la actividad enzimática (SOD, CAT, POD) mediante la activación de cascadas de señalización similares a las de reconocimiento de patógenos (PAMPs) (Aida <i>et al.</i> , 2025).	Promueven la eliminación de especies reactivas de oxígeno (ROS) gracias a su alto contenido de compuestos fenólicos y antioxidantes no enzimáticos (Meddich, 2022).

Implicaciones agronómicas y sostenibilidad

Los bioestimulantes algales cuentan con un amplio respaldo científico en condiciones de salinidad, incluyendo ensayos de campo, así como estudios fisiológicos y moleculares, lo que ha permitido establecer patrones de respuesta consistentes entre distintos cultivos y ambientes. Diversas investigaciones han demostrado que los metabolitos primarios y secundarios presentes en las algas mejoran la eficiencia metabólica mediante la regulación estomática, el mantenimiento del equilibrio iónico y la activación de sistemas antioxidantes enzimáticos, como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y peroxidasas (POX), contribuyendo a la mitigación del daño oxidativo celular (Aida *et al.*, 2025). Asimismo, el desarrollo de métodos de extracción sostenibles, como los procesos hidrotérmicos, ha permitido obtener estos compuestos bioactivos de manera eficiente sin recurrir a solventes químicos, favoreciendo su aplicación en sistemas agrícolas más sostenibles (Carmona-Rodríguez, 2019).

En contraste, los bioestimulantes botánicos presentan un menor grado de validación experimental, ya que muchos estudios se enfocan en especies específicas o en ensayos de corta duración, lo que limita la estandarización y la comparación entre resultados. No obstante, la evidencia disponible resalta su carácter multifuncional, al actuar simultáneamente como promotores del crecimiento y agentes de biocontrol (Aguilar-Mejía, 2023). Estos extractos han demostrado su capacidad para modular el metabolismo secundario de los cultivos, incrementando no solo la biomasa, sino también la calidad fitoquímica y la resistencia frente a plagas (Ali *et al.*, 2018). A pesar de ello, el estudio del potencial de extractos derivados de plantas mexicanas en la mitigación del estrés abiótico aún se encuentra en una etapa incipiente (Espinosa-Antón *et al.*, 2025).

En conjunto, la evidencia científica indica que estos bioestimulantes no actúan únicamente como fertilizantes, sino como moduladores fisiológicos capaces de activar rutas de señalización específicas, confiriendo plasticidad fenotípica a las plantas. Esta capacidad permite a los cultivos ajustar su morfología y fisiología en respuesta a condiciones de estrés abiótico (Boutahiri *et al.*, 2024).

Desde una perspectiva aplicada, los bioestimulantes algales están ampliamente integrados en la agricultura comercial, con formulaciones estandarizadas y protocolos de uso definidos que garantizan respuestas relativamente predecibles en campo. Su aplicación contribuye a una mitigación más eficiente del estrés abiótico, como la salinidad y la sequía, favoreciendo la estabilidad del rendimiento en condiciones climáticas variables. Además, pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes mediante la regulación de genes transportadores iónicos, como SOS1, lo cual resulta particularmente relevante en regiones con escasez hídrica o suelos degradados (Ali *et al.*, 2021; Senousy *et al.*, 2023).

Por su parte, los bioestimulantes botánicos representan una alternativa emergente con alto potencial para el desarrollo de insumos locales y sostenibles, especialmente en regiones con alta biodiversidad vegetal, como México. Sin embargo, su implementación a gran escala requiere aún de mayor investigación y validación que permitan estandarizar sus efectos y optimizar su aplicación en diferentes sistemas agrícolas (Tabla 4).

En este contexto, la integración de bioestimulantes algales y botánicos en la agricultura moderna constituye un componente clave para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles, al permitir equilibrar la productividad agrícola con la conservación del entorno. Estas herramientas no solo optimizan la eficiencia en el uso de recursos y fortalecen la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático, sino que también representan una alternativa de bajo impacto ambiental para reducir la dependencia de insumos sintéticos (Rouphael & Colla, 2020).

Tabla 4. Síntesis comparativa de las implicaciones agronómicas y sostenibilidad del uso de bioestimulantes algales y botánicos

Característica	Bioestimulantes algales	Bioestimulantes botánicos
Evidencia científica	Alta más de 100 estudios publicados, incluyendo ensayos de campo y revisiones; presencia de metaanálisis o revisiones sistemáticas ¹	Moderada a baja 30–100 estudios; Predominio de ensayos en invernadero/laboratorio ²
Consistencia de respuesta	Alta Resultados consistentes entre estudios, efecto positivo reproducible en >70 % de los estudios ³	Variable Poca validación en campo; resultados inconsistentes o dependientes de especie, dosis o ambiente ⁴
Composición	Relativamente uniforme Composición química bien caracterizada y repetible entre lotes ⁵	Altamente diversa Variabilidad significativa según especie, método de extracción y origen ²
Mecanismo frente a salinidad	Osmorregulación y antioxidantes Prolina, azúcares, etc. ⁶	Antioxidantes y señalización SOD, CAT, APX; fitohormonas, compuestos fenólicos ⁷
Potencial futuro	Consolidado Tecnología validada comercialmente + respaldo científico amplio ¹	Emergente En desarrollo, con evidencia aún limitada o en expansión ⁴

1 = (du Jardin, 2015; Khan *et al.*, 2009); 2 = (Bulgari *et al.*, 2019) 3 = (Calvo *et al.*, 2014); 4 = (Rouphael & Colla, 2020; Martínez-Lorente *et al.*, 2024); 5 = Craigie, 2011; 6 = Shukla *et al.*, 2019); 7 = (Yakhin *et al.*, 2017)

Visto desde esta perspectiva, la incorporación de extractos algales y botánicos constituye una estrategia innovadora que permite reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (SDGs), ayudando a mitigar los riesgos ambientales y de salud pública asociados con la agricultura convencional (Hernández-Pérez *et al.*, 2025a; Aida *et al.*, 2025). Su implementación no solo asegura la estabilidad del rendimiento y la calidad nutricional de los cultivos bajo escenarios de cambio climático y estrés abiótico severo como la salinidad y la sequía (Lau *et al.*, 2025; Singh *et al.*, 2025; Boutahiri *et al.*, 2024), sino que también optimiza la eficiencia de los recursos al mejorar la salud del suelo, validándose como una solución económicamente viable y ecológicamente segura para la seguridad alimentaria global (Rabhi *et al.*, 2025; Arraf *et al.*, 2025).

En conjunto, los bioestimulantes representan una alternativa natural, segura y ambientalmente sustentable que contribuye a reducir la dependencia de los agroquímicos sintéticos. Su versatilidad de aplicación y compatibilidad con distintos sistemas productivos los posicionan como una herramienta clave para promover una agricultura resiliente frente al estrés salino y los desafíos asociados al cambio climático (Figura 2).

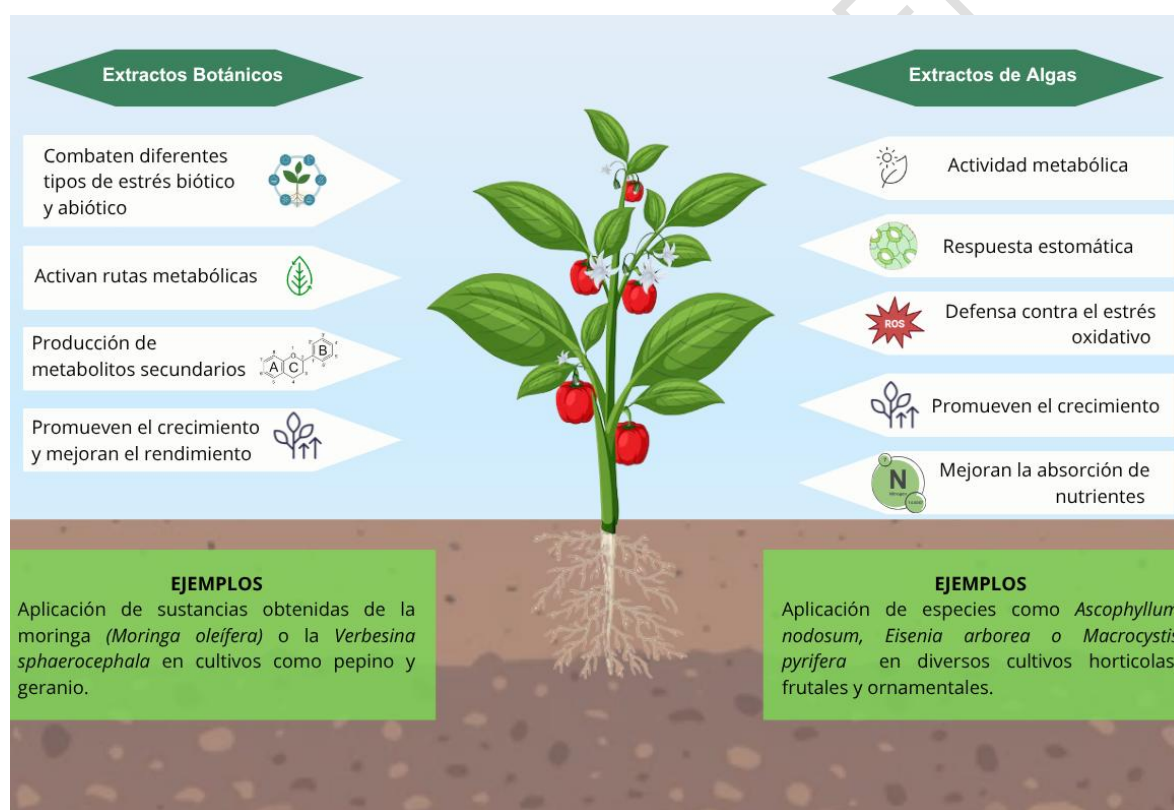


Figura 2. Los extractos botánicos y de algas marinas se presentan como una estrategia sostenible para mitigar el estrés salino y mejorar el rendimiento de los cultivos.

Conclusión

La salinidad representa uno de los principales desafíos para la agricultura moderna, agravado por los efectos del cambio climático y el uso intensivo de suelos y aguas de riego. Sus consecuencias van desde la reducción del rendimiento hasta la pérdida total de áreas productivas, comprometiendo la seguridad alimentaria. En este contexto, los bioestimulantes ofrecen una alternativa innovadora para apoyar a los productores. Su aplicación favorece la activación anticipada de mecanismos naturales de defensa, el cual induce la expresión de genes de respuesta al estrés y potencia la actividad enzimática antioxidante para neutralizar el daño oxidativo antes de que sea irreversible.

Asimismo, mejoran la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, mejorando la arquitectura radicular y promoviendo la acumulación de osmolitos compatibles que mantienen la turgencia celular bajo déficit hídrico fisiológico, resultando en un aumento de la tolerancia de los cultivos ante el estrés salino. Si bien no sustituyen otras prácticas de manejo agronómico, los bioestimulantes se perfilan como un complemento valioso en la búsqueda de una agricultura más productiva, sustentable y resiliente a condiciones ambientales adversas, ya que potencian la eficiencia fisiológica de las plantas, mejoran su capacidad de adaptación al estrés abiótico y optimizan el aprovechamiento de los recursos disponibles, contribuyendo así a sistemas agrícolas más eficientes y ambientalmente responsables.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abd El-Mageed, T. A., Semida, W. M., & Rady, M. M. (2017). Moringa leaf extract as biostimulant improves water use efficiency, physio-biochemical attributes of squash plants under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 193, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.004>
- Aguilar-Mejía, Y. (2023). Efecto antioxidante y antifúngico de los compuestos volátiles del hidrolato de tallos y hojas de *Verbesina sphaerocephala* (Asteraceae) [Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio Institucional de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/16636
- Ahmad, A., Blasco, B., & Martos, V. (2022). Combating salinity through natural plant extracts based biostimulants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 862034. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.862034>
- Ahmed, K. N., Pramanik, S. H. A., Khatun, M., Nargis, A., & Hasan, M. R. (2010). Efficacy of plant extracts in the suppression of insect pests and their effect on the yield of sunflower crop under different climatic conditions. *The Journal of Plant Protection Sciences*, 2(1), 53–58.
- Aida, B., Kasote, D., & Hyunsook Lee, J. (2025). Interaction of seaweed metabolites with plants to enhance protection against biotic and abiotic stresses. *Plant Protection Science*, 62(2), 93–145. <https://doi.org/10.17221/5/2025-pps>
- Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2021). Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants*, 10(3), 531. <https://doi.org/10.3390/plants10030531>
- Ali, E. F., Hassan, F. A. S., & Elgimabi, M. (2018). Improving the growth, yield and volatile oil content of *Pelargonium graveolens* L. Herit by foliar application with moringa leaf extract through motivating physiological and biochemical parameters. *South African Journal of Botany*, 119, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.10.003>
- Arraf, E., Al-madhagi, I., & Haissam, H. (2025). Plant extracts are a promising solution to alleviate salinity stress at the chili pepper germination stage. *Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology* 3(3), 868–884. <https://doi.org/10.59628/jast.v3i3.1663>
- Argentel-Martinez, L., Peñuelas-Rubio, O., Azizoglu, U., & Perales-Aguilar, L. (2024). Biotecnología agrícola aplicada. Pantanal Editora. <https://doi.org/10.46420/9786585756365>
- Arinaitwe, U., Yabwalo, D. N., & Hangamaisho, A. (2025). Unlocking the potential of biostimulants: A review of classification, mode of action, formulations, efficacy, mechanisms, and recommendations for sustainable intensification. *International Journal of Plant Biology*, 16(4), 122. <https://doi.org/10.3390/ijpb16040122>
- Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A.P., Kumari, A., Ghosh, T., Roy, A., Hembram, S., Gaikwad, D. J., Mondal, S., Bhattacharya, S., Jha, U.C., & Jespersen, D. (2023). Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Frontiers in Plant Science* 14, 1241736. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>
- Bello, A. S., & Ahmed, T. (2024). Moringa leaf extract alleviates salt stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by activating antioxidant defenses, reducing osmolyte accumulation, improving water status, and enhancing yield. *Plant stress*, 14, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100640>

- Bhowmick, S., Rai, G., Mishra, S. K., Bisht, N., & Chauhan, P.S. (2024). Bio-stimulants from medicinally and nutritionally significant plant extracts mitigate drought adversities in *Zea mays* through enhanced physiological, biochemical, and antioxidant activities. *Plant Physiology and Biochemistry*, 207, 108396. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108396>
- Boutahiri, S., Benrkia, R., Tembeni, B., Idowu, O. E., & Olatunji, O. J. (2024). Effect of biostimulants on the chemical profile of food crops under normal and abiotic stress conditions. *Current Plant Biology*, 40, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100410>
- Bonomelli, C., Celis, V., Lombardi, G., & Mártiz, J. (2018). Salt stress effects on avocado (*Persea americana* Mill.) plants with and without seaweed extract (*Ascophyllum nodosum*) application. *Agronomy*, 8(5), 64. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8050064>
- Brazales-Cevallos, D. K., Romero-Contreras, Y. J., Vences-Guzmán, M. Á., Torres, M., Aviles-Baltazar, N. Y., Sohlenkamp, C., & Serrano, M. (2022). Transcriptional characterization of the biostimulant effect of *Moringa oleifera* leaf extracts using *Arabidopsis thaliana* as a model. *South African Journal of Botany*, 144, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.011>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Carmona-Rodríguez, E. (2019). Aplicación de extractos hidrotérmicos de macroalgas como bioestimulantes en plantas de tomate [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro"]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/225017529949>
- Chen, W., Lin, F., Lin, K.-H., Chen, C., Xia, C., Liao, Q., Chen, S.-P., & Kuo, Y.-W. (2021). Growth promotion and salt-tolerance improvement of *Gerbera jamesonii* by root colonization of *Piriformospora indica*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41, 1219-1228. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10385-4>
- Chernane, H., Latique, S., Mansori, M., & El Kaoua, M. (2015). Salt stress tolerance and antioxidative mechanisms in wheat plants (*Triticum durum* L.) by seaweed extracts application. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*. 8(3), 36-44.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/publicaciones/eam2018.pdf>
- 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>
- Di Filippo-Herrera, D. A., Arvizu-Higuera, D. L., Rodríguez-Montesinos, Y. E., Muñoz-Ochoa, M., Hernández-Herrera R. M., Hernández-Carmona, G., (2022). Effect of fucoidan and alginate on germination and growth of mung bean seedling. *Hidrobiológica*, 33(3), 353–363. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbshidro/2022v32n3/filippo>
- El-Katony, T. M., Deyab, M. A., El-Adl, M. F., & Ward, F. M. E. N. (2021). Extracts of the brown alga *Dictyota dichotoma* (Hudson) JV Lamouroux alleviate salt stress in rice (*Oryza sativa* L.) during germination. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 986-999. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10156-7>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., Pizano-Andrade, J. C., & Salcedo-Pérez, E. (2025). Extractos botánicos con potencial bioestimulante para la agricultura en México: una revisión. *Biotechnia*, 27, e2633. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v27.2633>
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2021). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura - Sistemas al límite. Informe desíntesis 2021. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Farooq, M., Rizwan, M., Nawaz, A., Rehman, A., & Ahmad, R. (2017). Application of natural plant extracts improves the tolerance against combined terminal heat and drought stresses in bread wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203 (6), 528–538. <https://doi.org/10.1111/jac.12214>
- Feng, D., Zhang, W., Zheng, C., Tang, G., Adili, Y., Ge, C., & Xu, W. (2025). Mechanisms of plant extracts in alleviating drought and saline-alkali stress in plants. *Industrial Crops and Products*, 233, 121346. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121346>

- García-Morales, S., García, V., & León-Morales, J. (2021). Panorama Actual de los Bioestimulantes Agrícolas - Current Overview of Agricultural Biostimulants. In: Castañeda Nava, J.J. Topics of Biotechnological Tools for Agricultural Development. (pp 14-21). Ed. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/1314/1/2.%20T%C3%B3picos%20de%20Herramientas.pdf>
- 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>
- Hernández-Herrera, R. M., Gómez-Leyva, J. F., Sánchez-Hernández, C. V., Ocampo-Álvarez, H., Ramírez-Romero, R., & Palmeros-Suárez, P. A. (2024). Seaweed extract ameliorates salt stress in tomato plants by enhancing the antioxidant system and expression of stress-responsive genes. *Journal of Applied Phycology*, (36), 2269–2282. <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03236-8>
- Hernández-Herrera, R. M., Sánchez-Hernández, C. V., Palmeros-Suárez, P. A., Ocampo-Alvarez, H., Santacruz-Ruvalcaba, F., Meza-Canales, I. D., & Becerril-Espinosa, A. (2022). Seaweed extract improves growth and productivity of tomato plants under salinity stress. *Agronomy*, 12(10), 2495. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102495>
- Hernández-Pérez, A. R., Hernández-Herrera, R. M., Velasco-Ramírez, S. F., Velasco-Ramírez, A., Ramírez-Anguiano, A. C., & Velasco-Ramírez, A. P. (2025a). Effect of botanical extracts from *Verbesina sphaerocephala* on the growth and yield of tomato under greenhouse conditions. *Acta Agrobotanica*, 78, 1–16. <https://doi.org/10.5586/aa/201390>
- Hernández-Pérez, A. R., Velasco-Ramírez, S. F., Hernández-Herrera, R. M., Ramírez-Anguiano, A. C., Velasco-Ramírez, A., & Velasco-Ramírez, A. P. (2025b). Impact of *Verbesina sphaerocephala* extracts on seed germination and seedling development of tomato and mung bean. *Indian Journal of Horticulture*, 82(02), 209–216. <https://doi.org/10.58993/ijh/2025.82.2.13>
- Huez-Lopez, M. A., Samani, Z., Elías, J. L., Avilés, A. Á. & Flores, F. P. (2008). Efecto de un extracto vegetal en la germinación de semillas de chile (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones salinas. *Biotechnia*. 10(3), 11–19 <https://doi.org/10.18633/bt.v10i3.50>
- 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>
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28, 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Kularathne, M., Srikrishnah, S., & Sutharsan, S. (2021). Influence of seaweed (*Padina antrillarum*) extract foliar application on growth and flowering of roses variety 'local'. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 9(4), 235–241. <https://doi.org/10.3126/ijasbt.v9i4.36010>
- Kumari, J., Haque, M. I., Jha, R. K., & Rathore, M. S. (2022). The red seaweed *Kappaphycus alvarezii* antiporter gene ($KaNa^+/H^+$) confers abiotic stress tolerance in transgenic tobacco. *Molecular Biogyl Report*, 49, 3729–3743. <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07213-7>
- Lamz Piedra, A., & González Cepero, M. C. (2013). La salinidad como problema en la agricultura: la mejora vegetal una solución inmediata. *Cultivos Tropicales*, 34(4), 31–42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193228546005>
- Lau, S.-E., Lim, L. W. T., Hamdan, M. F., Chan, C., Saidi, N. B., Ong-Abdullah, J., & Tan, B. C. (2025). Enhancing plant resilience to abiotic stress: The power of biostimulants. *Phyton*, 94(1), 1–31. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.059930>
- Latef, A. A. H. A., Srivastava, A. K., Saber, H., Alwaleed, E. A., & Tran, L. S. P. (2017) *Sargassum muticum* and *Jania rubens* regulate amino acid metabolism to improve growth and alleviate salinity in chickpea. *Scientific Reports*, 7, 10537. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07692-w>
- Liu, H., Chen, X., Song, L., Li, K., Zhang, X., Liu, S., Qin, Y., & Li, P. (2019). Polysaccharides from *Grateloupia filicina* enhance tolerance of rice seeds (*Oryza sativa* L.) under salt stress. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 1197-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomac.2018.11.270>
- López-Serrano, L., Scalschi, L., Simeón, R., San Bautista, A., & González-Hernández, A. I. (2026). Harnessing the Power of Biostimulants: A comprehensive review of their role in enhancing agricultural productivity and sustainability. *Applied Sciences*, 16(4), 1924. <https://doi.org/10.3390/app16041924>
- Machado, R. M. A., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3(2), 30. <https://www.mdpi.com/2311-7524/3/2/30>

- Martínez-Lorente, S. E., Martí-Guillén, J. M., Pedreño, M. Á., Almagro, L. & Sabater-Jara, A. B. (2024). Higher plant-derived biostimulants: Mechanisms of action and their role in mitigating plant abiotic stress. *Antioxidants*, 13, 318. <https://doi.org/10.3390/antiox13030318>
- Mannino, G. (2023). A new era of sustainability: Plant biostimulants. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16329. <https://doi.org/10.3390/ijms242216329>
- Meddich, A. (2022). Biostimulants for resilient agriculture—improving plant tolerance to abiotic stress: A concise review. *Gesunde Pflanzen*, 75, 709–727. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00784-2>
- Minhas, P. S., Ramos, T. B., Ben-Gal, A., & Pereira L. S. (2020). Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues, *Agricultural Water Management*, 227, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105832>.
- 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>
- Naz, H., Aisha Akram, N., Ashraf, M., Ingo Hefft, D., & Latief Jan, B. (2022). Leaf extract of neem (*Azadirachta indica*) alleviates adverse effects of drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants through alterations in biochemical attributes and antioxidants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(3), 1367–1374. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.01.038>
- Nezamdoost, D., Ghahremani, Z., Baba Akbari, M., Barzegar, T., & Ranjbar, M. E. (2023). Irrigation with water enriched with seaweed extract to overcome effects of salinity in 'New red fire' leafy lettuce cultivation. *International Journal of Vegetable Science*, 29(2), 128–144. <https://doi.org/10.1080/19315260.2022.2137722>
- Parida, A. K. & Das, A. B. (2005) Salt tolerance and salinity effects on plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60 (3), 324–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2004.06.010>
- Padilla, A. L. S. (2017). Variabilidad espacial de la salinidad en suelos del distrito de riego 014, Mexicali Baja California [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México] <http://hdl.handle.net/20.500.11799/67920>
- Rabhi, M. L., Derbak, L., Bendif, H., Boufahja, F., Abu-Elsaoud, A. M., & Garzoli, S. (2025). Seaweed-derived biostimulants for sustainable crop production: A review. *Journal of Biotechnology*, 408, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2025.09.013>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 11, 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
- Rouphael, Y., De Micco, V., Arena, C., Raimondi, G., Colla, G., & De Pascale, S. (2017). Effect of *Ecklonia maxima* seaweed extract on yield, mineral composition, gas exchange, and leaf anatomy of zucchini squash grown under saline conditions. *Journal of Applied Phycology*, 29(1), 459-470. <https://doi.org/10.1007/S10811-016-0937-x>
- Salsinha, Y. C. F., Rini, D. S., Indradewa, D., Rachmawati, D., Alam, T., & Purwestri, Y. A. (2023). Exogenously applied *Casuarina equisetifolia* leaf extracts act as an osmoprotectant on proline accumulation under drought stress in local rice from Indonesia. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1210241. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1210241>.
- Senousy, H. H., Hamoud, Y. A., Abu-Elsaoud, A. M., Mahmoud Al zoubi, O., Abdelbaky, N. F., Zia-ur-Rehman, M., Usman, M., & Soliman, M. H. (2023). Algal bio-Stimulants enhance salt tolerance in common bean: Dissecting morphological, physiological, and genetic mechanisms for stress adaptation. *Plants*, 12(21), 3714. <https://doi.org/10.3390/plants12213714>
- 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 Science*, 22(2),123-131. <http://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Shukla, P. S., Mantin, E. G., Adil, M., Bajpai, S., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2019). *Ascophyllum nodosum*-based biostimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science*, 10, 655. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00655>
- Singh, M., Subahan, G. M., Sharma, S., Singh, G., Sharma, N., Sharma, U., & Kumar, V. (2025). Enhancing horticultural sustainability in the face of climate change: Harnessing biostimulants for environmental stress alleviation in crops. *Stresses*, 5(1), 23. <https://doi.org/10.3390/stresses5010023>
- Sumithra, K., Jutur, P. P., Carmel, B. D., & Reddy, A. R. (2006). Salinity-induced changes in two cultivars of *Vigna radiata*: responses of antioxidative and proline metabolism. *Plant Growth Regulation*, 50, 11–22. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9121-7>
- Velasco-Ramírez, A. P., Virgen-Calleros, G., Hernández-Herrera, R. M., Velasco-Ramírez, A., Corona-Cervantes, M. P., Munguía-Lizalde, D. M., & Hernández-Pérez, A. R. (2021). *Verbena sphaerocephala* extracts promote the

development of *Cucumis sativus* and reduce the damage caused by *Meloidogyne incognita*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39(2), 339-353. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2103-2>

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. (2016) Abiotic stress signaling and responses in plants. *Cell*, 167, 313-324. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>

Zörb, C., Geilfus, C. M., & Dietz, K. J. (2019). Salinity and crop yield. *Plant Biology*, 1, 31-38. <https://doi.org/10.1111/plb.12884>

Zou, P., Lu, X., Zhao, H., Yuan, Y., Meng, L., Zhang, C., & Li, Y. (2019). Polysaccharides derived from the brown algae *Lessonia nigrescens* enhance salt stress tolerance to wheat seedlings by enhancing the antioxidant system and modulating intracellular ion concentration. *Frontiers in Plant Science*, 10, 48. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00048>

ARTÍCULO EN PRENSA