

Artículo de divulgación

El papel de las microalgas y cianobacterias en la agricultura sostenible

The role of microalgae and cyanobacteria in sustainable agriculture

Regina Barboza-Rodríguez , Rosa M. Rodríguez-Jasso* , Héctor A. Ruiz** 

¹ Biorefinery Group, Departamento de Investigación de Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280 Saltillo, Coahuila, México

* Autores de correspondencia: *rrodriguez@uadec.edu.mx; ** hector_ruiz_leza@uadec.edu.mx

Recibido:

10/12/2025

Aceptado:

6/04/2026

Publicado:

1/05/2026

RESUMEN

Para 2050, el crecimiento demográfico habrá aumentado significativamente, lo que pondrá a gobiernos, agricultores y economías bajo gran presión, exigiendo producir más alimentos en tierras que ya están degradadas por la agricultura intensiva convencional. Décadas de uso agrícola intensiva ha dejado vastas extensiones de suelo erosionado y menos capaz de sustentar los cultivos de los que dependemos. En este contexto, algunos microorganismos fotosintéticos (que utilizan la luz solar para crecer) se presentan como alternativas prometedoras dentro de un modelo económico más sustentable y que pueden ser aprovechadas para general compuestos útiles con interés agrícola. La selección adecuada de especies de organismos fotosintéticos como las microalgas y cianobacterias para su cultivo resulta esencial, considerando factores como tasa de crecimiento, composición de la biomasa y adaptación a condiciones ambientales. A partir de estos cultivos se puede obtener biomasa de microalga y cianobacteria rica en compuestos como proteínas, polisacáridos, pigmentos, fitohormonas que presentan un amplio potencial en la industria agrícola como bioestimulante. La incorporación de estos mciroorganismos a los sistemas agrícolas nos ayuda a utilizar recursos de forma más eficiente y favorece una producción de alimentos más sostenible.

Palabras clave: Biorrefinería; Bioestimulantes, Bioeconomía circular; Bioproductos; Biotecnología

ABSTRACT

By 2050, population growth will have increased significantly, putting governments, farmers and economies under pressure to produce more food from land already degraded by conventional intensive agriculture. Decades of heavy agricultural use have left vast stretches of exhausted soil less capable of supporting the crops we depend on. In this context, some photosynthetic microorganisms (which use sunlight to grow) are presented as promising alternatives within a more sustainable economic model and can be used to generate useful compounds of agricultural interest. The proper selection of photosynthetic microorganisms such as microalgae and cyanobacteria species for cultivation is essential, considering factors such as growth rate, biomass composition, and adaptability to environmental conditions. The biomass of microalgae and cyanobacteria is rich in proteins,



polysaccharides, pigments and phytohormones, all of which have great potential in agriculture biostimulants; incorporating these microorganisms into agriculture systems helps us use resources more efficiently and supports a more sustainable food production.

Keywords: Biorefinery; Biostimulants; Circular bioeconomy; Bioproducts; Biotechnology.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024) se espera que el crecimiento poblacional aumente hasta alcanzar los 8.5 billones de personas para el 2030 y 9.7 billones para 2050 por lo que se prevé una mayor presión a la cadena de producción de alimentos dentro del sector agrícola que pueda garantizar la seguridad alimentaria de una manera sostenible y sustentable para asegurar el uso de recursos a largo plazo.

En las últimas décadas, dentro de la cadena alimentaria, se ha evidenciado una creciente relación entre la producción agrícola, las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático. Los factores climáticos derivados de estas actividades, como el aumento de la temperatura y la reducción de precipitaciones, generan los impactos más significativos, principalmente como consecuencia de acciones humanas como la deforestación, el manejo inadecuado de suelos y la agricultura intensiva (Giller et al., 2021; Molotoks et al., 2021). En el contexto agroalimentario, el aumento de temperatura ha llevado a una disminución en la cantidad y calidad de diversos cultivos como lo son maíz, soja, trigo, caña de azúcar, algodón y arroz (Dash et al., 2024).

Otro reto en la producción de alimentos son los herbicidas, que, aunque ayudan a controlar malezas, también pueden debilitar a los cultivos frente a plagas y enfermedades. Sin embargo, la resistencia hacia estos herbicidas de origen químicos ha llegado a causar alrededor de un 36% de pérdidas por la competencia directa por nutrientes y agua del suelo (Ofosu et al., 2023). En cuanto a factores abióticos, el estrés salino principalmente en zonas desérticas y semi desérticas ha tenido importantes impactos en el rendimiento y parámetros bioquímicos de los cultivos (Alotaibi, 2023).

En este contexto, en los últimos años ha crecido el interés por el uso de microorganismos o sustancias que, aplicados en pequeñas cantidades, ayudan a las plantas a absorber mejor los nutrientes ya mejorar la calidad de

los cultivos, a esto se les conoce como bioestimulante (du Jardin, 2015). Los avances científicos se han centrado en la aplicación de microorganismos benéficos para mejorar la movilización de nutrientes y estimular las defensas de las plantas frente a diferentes tipos de estrés. Por lo tanto, el presente artículo revisa el estado del arte sobre el uso de microalgas y cianobacterias como bioestimulantes, abarcando desde el cultivo de estos microorganismos, selección de especies adecuadas y la revisión de biocompuestos con importante actividad bioestimulante.

DESARROLLO DE UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE BASADA EN BIORREFINERÍAS

Las biorrefinerías se refieren al uso de biomásas para la transformación de materia prima a productos o compuestos de interés a través de procesos bioquímicos y termoquímicos dentro de un esquema de valorización de lo que se considera residuos (Ruiz et al., 2022). De acuerdo con el tipo de biomasa seleccionada, las biorrefinerías se pueden clasificar en tres generaciones: la primera se basa en el uso de cultivos como la caña de azúcar, y maíz para la generación de energía, la segunda se centra en el uso de residuos agroindustriales y forestales, y la tercera en biomásas acuáticas como micro y macroalgas (Khandelwal et al., 2025).

Las microalgas, incluidas dentro de las biorrefinerías de tercera generación, son microorganismos fotosintéticos con tamaños que varían entre 2 y 50 μm . Se encuentran en ambientes acuáticos tanto dulces como salados y son responsables de producir aproximadamente el 40 % del oxígeno del planeta (Elisabeth et al., 2021). De acuerdo con sus características, se dividen en dos grupos principales: las microalgas verdes (Chlorophyceae), que contienen un núcleo definido y contienen clorofila a y b, permitiéndoles captar la luz y generar oxígeno mediante la fotosíntesis (González-Fernández et al., 2017); y las cianobacterias o algas verdeazuladas (Cyanophyceae),



organismos procariotas (que no contienen un núcleo definido) rodeados por una pared de peptidoglicano y una membrana plasmática, clasificadas como bacterias gram negativas (Veaudor et al., 2020). Estas últimas pueden desarrollarse en condiciones extremas de temperatura y pH, y algunas especies tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico, contribuyendo así al ciclo de este elemento (Alvarez et al., 2021).

Pese a sus diferencias, microalgas y cianobacterias producen oxígeno mediante fotosíntesis y cumplen roles ecológicos similares; por lo tanto, en este artículo, el término 'microalgas' abarcará a ambos (microalgas y cianobacterias). La Figura 1 muestra una recopilación de imágenes en microscopio de microalgas y cianobacterias.

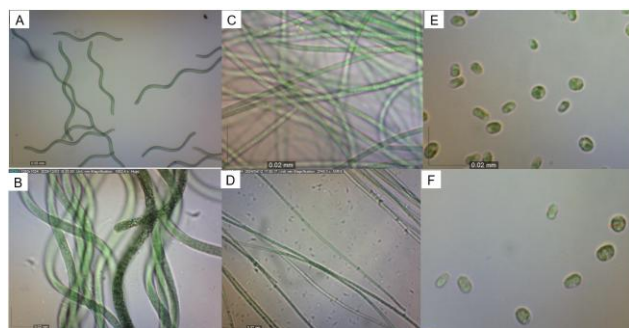


Figura 1. Micrografía de la cianobacteria *Arthrospira platensis* (A-B) y *Limnothrix* sp. (C-D) y la microalga *Chlorella* sp. (E-F).

En los últimos años han aumentado las estrategias para reducir el impacto ambiental de la agricultura, particularmente la acidificación y pérdida de fertilidad del suelo (Tripathi et al., 2020). En este contexto, las microalgas se destacan por su potencial en la agricultura moderna debido a sus compuestos dentro de la célula que favorecen la productividad vegetal. Poseen alto contenido de proteínas con aminoácidos esenciales, carbohidratos, vitaminas, polisacáridos, capacidad para absorber metales pesados y producir fitohormonas como citoquininas y compuestos similares a las auxinas, que estimulan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Ramakrishnan et al., 2023).

SELECCIÓN DE ESPECIES DE MICROALGA CON POTENCIAL USO BIOESTIMULANTE

Debido al amplio campo de aplicación de las microalgas es importante realizar una adecuada selección de la especie para asegurar un cultivo exitoso, homogéneo y de rápido crecimiento. Las especies comercialmente más utilizadas que presentan una mayor adaptabilidad se encuentran los géneros *Arthrospira*, *Nostoc*, *Tolypothrix*, *Chlorella*, *Dunaliella* y *Scenedesmus*, son conocidos por su alta tasa de duplicación y de crecimiento (Chittora et al., 2020; Chabili et al., 2024). Dichas especies presentan una rápida adaptación a variaciones de temperatura, luz y exposición a diversos climas (Aliyu et al., 2021).

La selección del género y especie de microalga depende del medio de cultivo, la disponibilidad de nutrientes y el tipo de metabolismo, es decir, de la forma en que obtienen su alimentos y energía: algunas producen su propio alimento utilizando la luz (al ser fotosintéticos), otras combinan distintas fuentes como sales, y otras dependen de materia orgánica, como azúcares (Abreu et al., 2022; Skifa et al., 2025).

EXTRACCIÓN DE BIOCOMPUESTOS

Los métodos de extracción de compuestos provenientes de microalgas tienen como objetivo la ruptura (lisis) celular y liberación de compuestos para aumentar su biodisponibilidad en el modelo vegetal de interés. En algunos casos se han aplicado células frescas de cianobacterias al suelo, sin embargo, se hará énfasis en los métodos de lisis celular.

A diferencia de biofertilizantes microbianos que suelen colonizar el suelo, las microalgas se emplean mediante extractos obtenidos durante su fase de máximo crecimiento para aprovechar los compuestos de interés (Brito-Lopez et al., 2025). El proceso posterior al cultivo comprende la cosecha de la biomasa, preparación del extracto y/o concentrados. Para ello, se pueden aplicar métodos de ruptura celular que se pueden clasificar en mecánicos (físicos) y no mecánicos (químicos y enzimáticos) (Gurreri et al., 2025). Los métodos físicos consisten en la lisis celular mediante fuerzas de cizallamiento como molinos de bolas; o energía mecánica como sonicadores. Algunas otras técnicas incluyen las basadas en calor con el uso de microondas o autoclave para la preparación de extractos (Rahman et al., 2022).

Por otro lado, los métodos químicos emplean solventes orgánicos, surfactantes o enzimas que interactúan con la pared celular de las microalgas (Rahman et al., 2022).

Entre los solventes empleados se encuentran hexano, etanol, acetona que se aplican en la extracción de lípidos o pigmentos, aunque al ser un método no selectivo puede arrastrar compuestos no deseados; finalmente, la hidrólisis ácida o enzimática permite la precipitación y recuperación de polisacáridos y proteínas (Navarro-López et al., 2023; Marjanović et al., 2024). La Figura 2 ilustra el proceso general de cultivo y obtención de biocompuestos, resaltando el reciclaje del medio de cultivo.

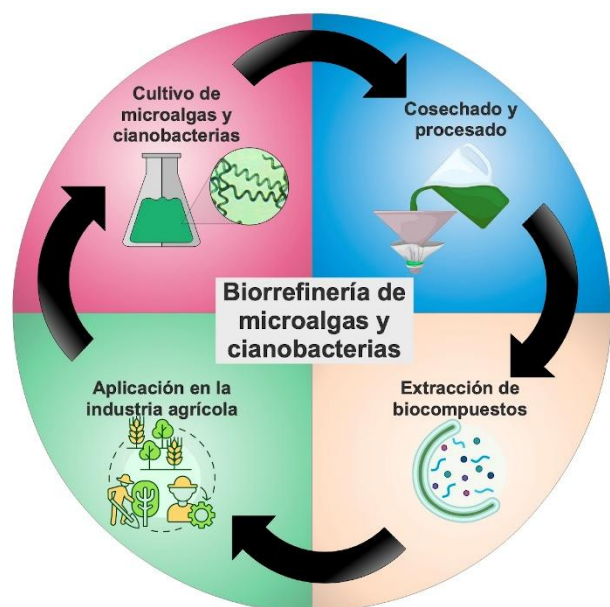


Figura 2. Etapas del proceso operativo para la obtención de bioestimulantes de microalgas y cianobacterias, que incluyen el cultivo, procesamiento y extracción de biocompuestos, así como la aplicación final del producto en el desarrollo vegetal.

BIOCOMPUESTOS CON ACTIVIDAD BIOESTIMULANTE

Fitohormonas

Las fitohormonas son un tipo de moléculas orgánicas de bajo peso molecular que están presentes en bajas concentraciones y actúan como señales químicas, promoviendo estimulación en procesos de raíces, tallos, en la fertilización y como respuesta al estrés de factores bióticos y abióticos. Generalmente, las fitohormonas se dividen en cinco grupos, auxinas, citoquininas, ácidos giberélico y abscísico y etileno (Quintas-Nunes et al., 2023).

En las microalgas, las fitohormonas se relacionan con un mayor crecimiento celular y la acumulación de lípidos, permeabilidad de la membrana, potencial fotosintético y como inductor a diversos metabolitos secundarios (Quintas-Nunes et al., 2023). Dentro de las auxinas, el ácido indol-3-acético (IAA) y el ácido indol-3-butírico (IBA) son las auxinas más importantes ya que regulan el crecimiento, formación de raíces adventicias y la elongación natural; estas auxinas junto con sus precursores (IPyA e IAM) se han encontrado en 46 especies de microalgas y cianobacterias (Wang et al., 2021).

Hidrolizados de proteínas

El contenido total de proteínas varía entre especies de microalgas, sin embargo, algunas como el género *Arthrospira* puede llegar al 70% de en base a su peso seco, conteniendo el perfil completo de aminoácidos esenciales (Khanra et al., 2018; Villaró et al., 2022). Las proteínas en las células de microalgas se encuentran en la pared celular (alrededor del 20%), dentro de la pared (50%) y el resto puede migrar hacia dentro y fuera de la célula en distintos métodos de difusión (Grossmann et al., 2020).

Los hidrolizados de proteínas son un mezclado de aminoácidos, y péptidos que derivan de extractos de microalgas a través de hidrólisis ácida, alcalina o medios enzimáticos. Los hidrolizados de proteínas pueden inducir respuestas hacia ciertas fitohormonas ya que algunos aminoácidos como el triptófano actúa como precursor de las auxinas (Omoareloje et al., 2021).

Pigmentos

Entre los pigmentos de mayor relevancia biotecnológica destaca la ficocianina, un pigmento protéico de color azul brillante presente exclusivamente en cianobacterias. Es soluble en agua y puede llegar a representar hasta el 20% seco de la biomasa (Thevarajah et al., 2022; Marjanović et al., 2024). La ficocianina ayuda a aprovechar la luz del sol para obtener energía. Forma parte de un sistema especializado que capta y transforma la luz, facilitando el proceso de fotosíntesis. Además de la ficocianina, existen otros pigmentos similares, cada uno con distintos colores (como la ficoeritrina de un color rojo), aunque suelen encontrarse en menor cantidad. La ficocianina presenta propiedades antioxidantes, anticancerígenas, antiinflamatorias, antimicrobianas, lo que lo convierte

en un pigmento natural con alto valor en el mercado (Thevarajah et al., 2022; Fernandes et al., 2023)..

Polisacáridos

Los polisacáridos son macromoléculas constituida por unidades de azúcar, en las microalgas representan alrededor del 46% del peso seco de las microalgas. *A. platensis*, *Nostoc* sp., *Calothrix* spp., *Chlorella* spp., *Dunaliella salina*, *Tetraselmis* spp., son conocidos por su producción de exopolisacáridos. La incorporación de estos compuestos derivados de estas biomásas en el suelo se relaciona con un incremento en el carbón orgánico disponible, eleva los niveles de carbón oxidable y, en general, favorece la disponibilidad de nutrientes (Brito-Lopez et al., 2025). Brevemente, los polisacáridos de microalgas son hidrolizados por enzimas del suelo como β -glucanasas y quitinasas liberando azúcares que son percibidos por receptores de la membrana de las plantas (Parmar et al., 2023).

Disponibilidad de micronutrientes

La intensificación agrícola ha reducido la disponibilidad de micronutrientes esenciales como Zinc, Hierro, Cobre y Manganeseo, generando deficiencia en las funciones biológicas vitales como la fotosíntesis, síntesis de proteínas y desarrollo fisiológico de las plantas. Por otro lado, algunas cianobacterias como *Anabaena* y *Synechococcus* ayudan a mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales. Esto se debe a que liberan sustancias llamadas sidéforos, que funcionan como imanes capaces de captar ciertos elementos como el hierro y hacerlo más accesible en el suelo, especialmente en ambientes donde estos elementos son difíciles de aprovechar (Alvarez et al., 2021; Parmar et al., 2023).

Además, las cianobacterias contribuyen a la fijación de nitrógeno atmosférico en amoníaco mediante células especializadas que contienen la enzima nitrogenasa, la cual se activa en el día y se detiene por la noche cuando se degrada dicha enzima (El-Seedi et al., 2023). Este proceso favorece la fertilidad del suelo y beneficia especialmente cultivos como el arroz. Por otro lado, la capacidad de solubilización de fósforo es de importancia debido al papel de este elemento en la formación de energía y ATP, y composición de membrana de fosfolípidos (Song et al., 2022) y solubilizando formas menos solubles de fósforo como fosfato de Calcio $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, fosfato férrico (FePO_4), fosfato de aluminio

(AlPO_4) e hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$). Entre los géneros más conocidos para fijar nitrógeno y solubilizar fósforo se encuentran *Anabaena*, *Nostoc*, *Calothrix*, *Syctonema* y *Tolupothrix* (Marín-Marín et al., 2024). En la Tabla 1 se puede encontrar un resumen del uso de microalgas como bioestimulante, extracción del biocompuesto de interés y los principales efectos en la planta estudiada

Tabla 1. Aplicaciones de microalgas como bioestimulantes y sus principales efectos en la planta.

Microalga	Planta	Modo aplicación	Efecto observado	Referencias
<i>A. platensis</i>	Rúcula	Foliar	Mayor número de hojas	Hassan et al., (2017)
<i>C. vulgaris</i>	Tomate	Foliar/suelo	Calidad de fruto	Suchithra et al., (2022)
<i>A. minutissima</i>	Tomate	Semilla	Biocontrol	Righini et al., (2023)
<i>S. platensis</i>	Albahaca	Foliar	Mayor crecimiento y pigmentos	Elbanna et al., (2024)
<i>E. gracilis</i>	Lechuga	Semilla	Aumento ácido graso	Butzke et al., (2024)
<i>D. salina</i>	Tomate	Suelo	Vigor de germinación	Rachidi et al., (2020)
<i>C. vulgaris</i>	Trigo	Semilla	Aumento fertilidad suelo	Minaoui et al., (2024)

CONCLUSIONES

La transición mundial de producción de cultivos hacia prácticas sostenibles de agricultura es un paso fundamental ante los desafíos actuales ambientales y sociales en torno a la seguridad alimentaria. En este contexto, el cultivo de microalgas y aprovechamiento de sus recursos biotecnológicos mediante plataformas de biorrefinerías permite valorizar residuos, promoviendo sistemas productivos más eficientes y ambientalmente responsables. Estas estrategias se alinean con los principios de bioeconomía circular. En este sentido, las investigaciones a futuro se deben proyectar hacia la optimización de los sistemas de cultivo de microalgas y como producto, obtener extractos con biocompuestos de interés agrícola.

Agradecimientos

Regina Barboza-Rodríguez agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades y Tecnología por la beca de doctorado otorgada (número de beca 1229508).



Literatura citada

- Abreu, A.P. et al. (2022) “A comparison between microalgal autotrophic growth and metabolite accumulation with heterotrophic, mixotrophic and photoheterotrophic cultivation modes,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, p. 112247. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112247>.
- Aliyu, A., Lee, J.G.M. and Harvey, A.P. (2021) “Microalgae for biofuels via thermochemical conversion processes: A review of cultivation, harvesting and drying processes, and the associated opportunities for integrated production,” *Bioresource Technology Reports*, 14, p. 100676. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100676>.
- Alotaibi, M. (2023) “Climate change, its impact on crop production, challenges, and possible solutions,” *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(1), p. 13020. Available at: <https://doi.org/10.15835/nbha51113020>.
- Alvarez, A.L. et al. (2021) “Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture,” *Algal Research*, 54, p. 102200. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102200>.
- Brito-Lopez, C. et al. (2025) “Plant growth-promoting microbes and microalgae-based biostimulants: sustainable strategy for agriculture and abiotic stress resilience,” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 380(1927). Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2024.0251>.
- Butzke, V.L.L. et al. (2024) “Unlocking the potential of *Euglena gracilis* cultivated in piggery wastewater: biomass production, nutrient removal, and biostimulant potential in lettuce and tomato plants,” *Journal of Applied Phycology*, 36(5), pp. 2681–2702. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03286-y>.
- Chabili, A. et al. (2024) “A Comprehensive Review of Microalgae and Cyanobacteria-Based Biostimulants for Agriculture Uses,” *Plants*, 13(2), p. 159. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants13020159>.
- Chittora, D. et al. (2020) “Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture,” *Biochemistry and Biophysics Reports*, 22, p. 100737. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100737>.
- Dash, S., D., J.N. and V. S., C. (2024) “Climate Crisis and Agricultural Response: Climate Resilient Crops for Sustainability in Food Production Systems,” *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(6), pp. 440–458. Available at: <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i62496>.
- Elbanna, H.M. et al. (2024) “Enhancing french basil growth through synergistic Foliar treatment with copper nanoparticles and *Spirulina* sp.,” *BMC Plant Biology*, 24(1), p. 512. Available at: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05153-x>.
- Elisabeth, B., Rayen, F. and Behnam, T. (2021) “Microalgae culture quality indicators: a review,” *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(4), pp. 457–473. Available at: <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1854672>.
- El-Seedi, H.R. et al. (2023) “Review of Marine Cyanobacteria and the Aspects Related to Their Roles: Chemical, Biological Properties, Nitrogen Fixation and Climate Change,” *Marine Drugs*, 21(8), p. 439. Available at: <https://doi.org/10.3390/md21080439>.
- FAO (2024) The State of Food Security and Nutrition in the World 2024, The State of Food Security and Nutrition in the World 2024. FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO; Available at: <https://doi.org/10.4060/cd1254en>.
- Fernandes, R. et al. (2023) “Exploring the Benefits of Phycocyanin: From *Spirulina* Cultivation to Its Widespread Applications,” *Pharmaceuticals*, 16(4), p. 592. Available at: <https://doi.org/10.3390/ph16040592>.
- Giller, K.E. et al. (2021) “The future of farming: Who will produce our food?,” *Food Security*, 13(5), pp. 1073–1099. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6>.
- González-Fernández, C. et al. (2017) “Hydrothermal Processing of Microalgae,” in *Hydrothermal Processing in Biorefineries*. Cham: Springer International Publishing, pp. 483–500. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56457-9_21.
- Grossmann, L., Hinrichs, J. and Weiss, J. (2020) “Cultivation and downstream processing of microalgae and cyanobacteria to generate protein-based technofunctional food ingredients,” *Critical*



- Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(17), pp. 2961–2989. Available at: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1672137>.
- Gurreri, L. et al. (2025) “Is the production of microalgae and the derived bioproducts sustainable? A meta-review outlining the challenges and opportunities of circular bioeconomy and zero-waste approaches,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), p. 118053. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118053>.
- Hassan, S.M., Ashour, M. and Soliman, A.A.F. (2017) “Anticancer Activity, Antioxidant Activity, Mineral Contents, Vegetative and Yield of *Eruca sativa* Using Foliar Application of Autoclaved Cellular Extract of *Spirulina platensis* Extract, Comparing to N-P-K Fertilizers.,” *Journal of Plant Production*, 8(4), pp. 529–536.
- du Jardin, P. (2015) “Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation,” *Scientia Horticulturae*, 196, pp. 3–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
- Khandelwal, N. et al. (2025) “Life-cycle assessment of three biorefinery pathways across different generations,” *Scientific Reports*, 15(1), p. 13135. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96474-w>.
- Khanra, S. et al. (2018) “Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review,” *Food and Bioproducts Processing*, 110, pp. 60–84. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.02.002>.
- Marín-Marín, C. et al. (2024) “Cyanobacteria and microalgae as potential sources of biofertilizers: a review,” *Actualidades biológicas*, 46(120). Available at: <https://doi.org/10.17533/udea.acbi/v46n120a06>.
- Marjanović, B. et al. (2024) “Bioactive Compounds from *Spirulina* spp.—Nutritional Value, Extraction, and Application in Food Industry,” *Separations*, 11(9), p. 257. Available at: <https://doi.org/10.3390/separations11090257>.
- Minaoui, F. et al. (2024) “Biostimulant effect of green soil microalgae *Chlorella vulgaris* suspensions on germination and growth of wheat (*Triticum aestivum* var. Ahtar) and soil fertility,” *Algal Research*, 82, p. 103655. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103655>.
- Molotoks, A., Smith, P. and Dawson, T.P. (2021) “Impacts of land use, population, and climate change on global food security,” *Food and Energy Security*, 10(1). Available at: <https://doi.org/10.1002/fes3.261>.
- Navarro-López, E. et al. (2023) “Downstream processing of *Scenedesmus* sp. to obtain biostimulants,” *Journal of Applied Phycology*, 35(5), pp. 2193–2203. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03039-3>.
- Ofofu, R. et al. (2023) “Herbicide Resistance: Managing Weeds in a Changing World,” *Agronomy*, 13(6), p. 1595. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061595>.
- Omoarelojie, L.O. et al. (2021) “Modes of action of biostimulants in plants,” in S. Gupta and J. V Van Staden (eds.) *Biostimulants for Crops from Seed Germination to Plant Development*. 1st ed. Elsevier, pp. 445–459. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823048-0.00015-0>.
- Parmar, P. et al. (2023) “Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy based solutions,” *Frontiers in Plant Science*, 14. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073546>.
- Quintas-Nunes, F. et al. (2023) “Plant Growth Promotion, Phytohormone Production and Genomics of the Rhizosphere-Associated Microalga, *Micractinium rhizosphaerae* sp. nov.,” *Plants*, 12(3), p. 651. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants12030651>.
- Rachidi, F. et al. (2020) “Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution,” *Biotechnology Reports*, 25, p. e00426. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00426>.
- Rahman, Md.M., Hosano, N. and Hosano, H. (2022) “Recovering Microalgal Bioresources: A Review of Cell Disruption Methods and Extraction Technologies,” *Molecules*, 27(9), p. 2786. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules27092786>.
- Ramakrishnan, B. et al. (2023) “Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view,” *Environmental Science: Advances*, 2(4), pp. 586–611. Available at: <https://doi.org/10.1039/D2VA00158F>.



- Righini, H. et al. (2023) “New insight on tomato seed priming with Anabaena minutissima phycobiliproteins in relation to *Rhizoctonia solani* root rot resistance and seedling growth promotion,” *Phytoparasitica*, 51(4), pp. 763–781. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12600-023-01056-z>.
- Ruiz, H.A. et al. (2022) “Sustainable Biorefinery Processing for Hemicellulose Fractionation and Bio-based Products in a Circular Bioeconomy,” in M. Brienzo (ed.) *Hemicellulose Biorefinery: A Sustainable Solution for Value Addition to Bio-Based Products and Bioenergy*. 1st ed. Springer, Singapore, pp. 39–69. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3682-0_2.
- Skifa, I. et al. (2025) “Microalgae cultivation in raceway ponds: Advances, challenges, and hydrodynamic considerations,” *EFB Bioeconomy Journal*, 5, p. 100073. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bioeco.2024.100073>.
- Song, X. et al. (2022) “Potential applications for multifunctional microalgae in soil improvement,” *Frontiers in Environmental Science*, 10. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1035332>.
- Suchithra, M.R. et al. (2022) “Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation,” *South African Journal of Botany*, 146, pp. 740–750. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.12.022>.
- Thevarajah, B. et al. (2022) “Large-scale production of *Spirulina*-based proteins and c-phycoerythrin: A biorefinery approach,” *Biochemical Engineering Journal*, 185, p. 108541. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108541>.
- Tripathi, S. et al. (2020) “Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology,” in Majeti Narasimha Vara Prasad (ed.) *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. Elsevier, pp. 25–54. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00002-7>.
- Veaudor, T. et al. (2020) “Recent Advances in the Photoautotrophic Metabolism of Cyanobacteria: Biotechnological Implications,” *Life*, 10(5), p. 71. Available at: <https://doi.org/10.3390/life10050071>.
- Villarro, S. et al. (2022) “Optimisation of Operational Conditions during the Production of *Arthrospira platensis* Using Pilot-Scale Raceway Reactors, Protein Extraction, and Assessment of their Techno-Functional Properties,” *Foods*, 11(15), p. 2341. Available at: <https://doi.org/10.3390/foods11152341>.
- Wang, C. et al. (2021) “The Active Phytohormone in Microalgae: The Characteristics, Efficient Detection, and Their Adversity Resistance Applications,” *Molecules*, 27(1), p. 46. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules27010046>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

