

Producción de biofertilizantes a partir de microalgas

Biofertilizer production from microalgae

Yadira Collahuazo-Reinoso*¹ and Salomé Araujo-Abad²

¹ *Laboratorio de Microbiología Vegetal. Centro de Biotecnología. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.*

² *Laboratorio de Cultivo de Células y Tejidos. Centro de Biotecnología. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.*

Fecha de recepción del manuscrito: 21/10/2019

Fecha de aceptación del manuscrito: 26/11/2019

Fecha de publicación: 31/12/2019

Resumen—Los biofertilizantes preparados con extractos de microalgas son una alternativa sostenible en el mejoramiento, producción y protección de los cultivos agrícolas, siendo uno de los campos por explorar y más prometedores de la biotecnología y la bioingeniería. Las microalgas son microorganismos multifuncionales que poseen eficiencia fotosintética, capacidad de suministrar nitrógeno en formas disponibles para las plantas, además potencian el desarrollo de los cultivos por medio de reguladores de crecimiento o fitohormonas (auxinas, giberelinas y citoquinas) y a altos niveles de macro y micronutrientes, indispensables para las plantas. Estos microorganismos fotosintéticos necesitan condiciones estándar para su crecimiento que se asemejan a las de las plantas: luz, temperatura (18-28°C), pH (6-9) y nutrientes que pueden provenir de distintas fuentes tanto orgánicas (biol, compost, gallinaza) como inorgánicas (agroquímicos). Además, pueden ser cultivadas para su producción a gran escala en sistemas abiertos a la atmósfera y cerrados cumpliendo condiciones controladas, como en el caso de los fotobiorreactores. En la presente revisión se comparan los diferentes tipos de biofertilizantes, cultivos de microalgas y su producción a gran escala, se presenta una perspectiva de la situación actual de los biofertilizantes en el mundo y un análisis de los principales retos a vencer como el costo de producción, selección y optimización de técnicas de aislamiento de cepas, diseño de biorreactores, etc.

Palabras clave—Biotecnología; Bioestimulante; Microalgas; Agroquímicos; Fotobiorreactores.

Abstract—Biofertilizers of microalgae extracts are a sustainable alternative in the improvement, production and protection of agricultural crops, being one of the most promising fields of biotechnology and bioengineering to be explored. Microalgae are multifunctional microorganisms that have photosynthetic efficiency, ability to supply nitrogen in available forms for plants, also improve the development of crops through phytohormones (auxins, gibberellins and cytokines) and macro and micronutrients, essential for plants. These photosynthetic microorganisms need standard conditions for their growth that resemble those of plants: light, temperature (18-28°C), pH (6-9) and nutrients that can come from different organic sources (biol, compost, manure poultry) as inorganic (agrochemicals). Besides, they can be culture for large-scale production in open atmosphere systems and closed systems under controlled conditions, as in photobioreactors. In the present review, we compare the different types of biofertilizers, microalgae cultures and their large-scale production, we present a perspective of biofertilizers in the world and an analysis of the main challenges to overcome, such as: the cost of production, selection and optimization of strains isolation techniques, bioreactors design, etc.

Keywords—Biotechnology; Biostimulant; Microalgae; Agrochemicals; Photobioreactors.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas agronómicos a los que se enfrenta el mundo actualmente es el uso indiscriminado de agroquímicos o fertilizantes sintéticos, con los que no se han obtenido mayores rendimientos en los cultivos (O. Grageda-Cabrera *et al.*, 2011) pero sí han propiciado diversos efectos negativos ambientales y sanitarios. Entre los problemas ambientales se destaca la degradación ecológica que ha llevado a la existencia de zonas muertas en los océanos, eutrofización, infertilidad del suelo y pérdida de biodiversidad (Kohler y Triebkorn, 2013). En la salud humana, se ha evidenciado que con el paso del tiempo el uso de agro-

químicos afecta tanto a los agricultores y/o técnicos quienes los aplican como a las personas que viven en zonas cercanas a la aplicación (Vargas, 2015). Además, los fertilizantes nitrogenados han elevado su precio en el mercado aumentando los costos de producción y disminuyendo la rentabilidad de los cultivos (O. A. Grageda-Cabrera *et al.*, 2018).

Una alternativa para reducir el empleo de químicos es el uso total o parcial de biofertilizantes (Aghili *et al.*, 2014), definidos como productos que contienen microorganismos vivos o componentes derivados de organismos como las bacterias, hongos y algas que promueven las propiedades químicas y biológicas del suelo, además restauran su fertili-

dad y estimulan el crecimiento de las plantas (Abdel-Raouf *et al.*, 2012). Además, aportan un paso importante en la agricultura sostenible (Lauriano-Barajas y Vega-Frutis, 2018), siendo respetuosos con el medio ambiente y aceptados por la sociedad (Mamani de Marchese Filippone, 2018). En este sentido, los biofertilizantes a base de microalgas son considerados como una alternativa sostenible, rentable y amigable con el medio ambiente en comparación con los fertilizantes químicos, puesto que no solo mejoran la producción agrícola, sino que favorecen el nicho microbiológico del suelo y disminuyen la contaminación ambiental (García-Orellana *et al.*, 2016).

El uso de microalgas en la producción de biofertilizantes ha surgido como un aporte de la biotecnología y como una opción promisoriosa debido a su capacidad multifuncional, eficiencia fotosintética y capacidad de suministrar nitrógeno en formas disponibles para las plantas, entre otras (García-Orellana *et al.*, 2016). Además, existen diversos estudios que han demostrado que algunos extractos de microalgas potencian el crecimiento de los cultivos por medio de reguladores de crecimiento (auxinas, giberelinas y citoquinas) y a altos niveles de macro y micronutrientes, indispensables para las plantas (Tarakhovskaya *et al.*, 2007).

BIOFERTILIZANTES

Los biofertilizantes son formulaciones de microorganismos vivos (Nagananda *et al.*, 2010) que solubilizan el fósforo inorgánico e incrementan el rendimiento de los cultivos, y en el caso de las formulaciones compuestas por cianobacterias y *Rhizobium* además fijan el nitrógeno atmosférico, lo que significa una opción beneficiosa para los agricultores debido a que reducen el uso de fertilizantes de síntesis química (Camelo-Rusique *et al.*, 2017) y garantizan un desarrollo sustentable (Restrepo-Correa *et al.*, 2017). Pueden ser aplicados directamente en el suelo, en las semillas o en las superficies vegetales (Castillo *et al.*, 2007). En cultivos extensivos e intensivos es aceptable el uso de biofertilizantes como una alternativa tecnológica sustentable para el medio ambiente. Sin embargo, se ha generado polémica respecto al uso de biofertilizantes con bacterias vivas, también llamados inóculos, a razón de que la respuesta de los cultivos no es totalmente predecible (Creus, 2017).

TIPOS

Existen biofertilizantes bacterianos, fúngicos (O. A. Grageda-Cabrera *et al.*, 2018), de cianobacterias (Chatterjee *et al.*, 2017) y de origen algal (Boraste *et al.*, 2009). La presentación puede ser en estado líquido o sólido (Camelo-Rusique *et al.*, 2017), y la formulación se puede realizar con un solo tipo de microorganismo o en combinación con varios de ellos (Boraste *et al.*, 2009). Los biofertilizantes a base de hongos micorrízicos y rizobacterias PGPR (del inglés *Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) que según el lugar donde se desarrollen se denominan simbióticas, endofíticas y bacterias de vida libre (Criollo y Obando, 2012), tienen la capacidad de aumentar la biomasa, la captación de nutrientes, la supervivencia y el tamaño de raíces y tallos en diversas especies vegetales

(Angulo *et al.*, 2014). Además, incrementan la absorción de nutrientes, contribuyen a la fijación de nitrógeno, control biológico y producción de sideróforos (Layne y José, 2008) y fitohormonas (González *et al.*, 2015).

Las principales fitohormonas que producen son: auxinas en un 86% (González *et al.*, 2015), giberelinas, citoquinas y ácido abscísico (Angulo *et al.*, 2014). También promueven la producción de sustancias químicas por la planta que inhiben el desarrollo de patógenos, elevan la competitividad, inducen resistencia a la planta y mejoran la respuesta a factores externos que pueden producir estrés (Egamberdiyeva y Höflich, 2004). Los biofertilizantes a base de algas por su composición fitoquímica, brindan la disponibilidad de nutrientes como Cu, Mn, Fe, Ca, Mg y fitohormonas, que al aplicarlos directamente o compostados tienen efecto bioestimulante en cultivos (Tripathi *et al.*, 2008).

TIPOS DE MICROALGAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES

Las algas son un grupo de organismos fotosintéticos que secuestran el carbono del ambiente y son responsables del 50% de la fotosíntesis total en la tierra; intervienen en la movilización de macro y micronutrientes a través del ciclo y transformaciones bioquímicas, producción de compuestos bioactivos como polisacáridos, antimicrobianos, hormonas de crecimiento y mantienen la productividad acuático-terrestre de los ecosistemas (Moroney y Ynalvez, 2009).

Los biofertilizantes a base de algas tienen la propiedad de fijar nitrógeno atmosférico, secuestran el dióxido de carbono atmosférico (Elbert *et al.*, 2012), mejoran la porosidad del suelo (Sahu *et al.*, 2012), incrementan la retención de agua, y producen auxinas, giberelinas, vitaminas y aminoácidos (Rodríguez *et al.*, 2006); luego de su muerte benefician el desarrollo de otros microorganismos del suelo, secretan exopolisacáridos y sustancias bioactivas que intervienen en la recuperación de nutrientes del suelo y movilización de formas insolubles de fosfatos inorgánicos (Chatterjee *et al.*, 2017).

Inocular microalgas en los cultivos promueve que las plantas generen enzimas de defensa, transportadores y agentes quelantes entre otras sustancias que incrementan el crecimiento, rendimiento de los cultivos y la inmunidad de la planta a patógenos (Gupta *et al.*, 2013). Además, aumenta la calidad de los frutos, las características nutricionales, el rendimiento del grano (Coppens *et al.*, 2015) y mejoran las interacciones microbianas de los organismos presentes en el suelo (Karthikeyan *et al.*, 2007). Los diferentes tipos de algas más estudiados por sus aplicaciones como biofertilizantes en diversos cultivos se detallan en la Tabla 1.

Aunque en un inicio la aplicación de algas marinas vivas o desecadas fue lo más usual, hoy en día la investigación se ha abierto a una nueva posibilidad de investigación en las algas de agua dulce (Nain *et al.*, 2010). Cuando el biofertilizante está constituido por algas vivas se debe considerar que el suelo debe mantener una hidratación

Tabla 1: Tipos de algas y cultivos en las que han sido aplicadas.

Alga	Tipo	Cultivo	Referencia
<i>Nostoc</i> sp.	Verde- Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Tripathi <i>et al.</i> , 2008
<i>Anabaena doliolum</i>	Verde- Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	
<i>Westiellopsis</i> sp.	Verde- Azul	Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	
<i>Chlorella minutissima</i>	Verde	Frejol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Khan <i>et al.</i> , 2019 Hovde <i>et al.</i> , 2018 Tello, 2018
<i>Scendesmus</i> sp.	Verde	Frejol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	Khan <i>et al.</i> , 2019 Tello, 2018
<i>Nannochloropsis</i> sp.	Verde	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Coppens <i>et al.</i> , 2015

continua para asegurar la estructura celular, facilitar la adquisición de nutrientes y la difusión de gases. Cuando la desecación temporal del suelo ocurre en ambientes áridos y semiáridos las algas se mezclan con la materia orgánica del suelo para cumplir funciones en el ciclo de nutrientes del suelo y en los flujos de agua (Maestre *et al.*, 2011). Se ha comprobado que la aplicación de algas al suelo establece un biofilm fotosintético e incrementa la biomasa eucariota y procariota, lo que permite que se desarrollen actividades de microorganismos heterotróficos (Marks *et al.*, 2017). La aplicación de biomasa de algas a la superficie del suelo suministra nitrógeno (N) y fósforo (P), y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. La liberación de nitrógeno en el medio ambiente es de forma lenta, lo que permite que sea asimilado por las plantas y evita pérdidas innecesarias del nutriente (Castro *et al.*, 2017).

CULTIVO DE MICROALGAS

La agricultura o cultivo de algas combina la agricultura tradicional, luz solar, CO_2 , agua y aportes de macro y micronutrientes con las necesidades de la acuicultura, la calidad del agua y la eliminación de residuos (Trentacoste *et al.*, 2015). La biotecnología de estos microorganismos fotosintéticos ha progresado lenta pero significativamente en los últimos años. Los factores limitantes del progreso han sido las deficientes técnicas de cultivo empleadas a gran escala, para lo que se han diseñado fotobiorreactores con sistemas de cultivo mejorados (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

Existen algunos parámetros ampliamente conocidos a tomar en cuenta, desde la selección de la especie, luz, temperatura, pH, CO_2 y nutrientes, que son claves en el correcto desarrollo y producción de biomasa algal (McGriff y McKinney, 1972).

La exposición de las microalgas a luz es necesaria al ser microorganismos fotosintéticos. En ausencia de nutrientes la fotosíntesis se incrementa, sin embargo la exposición prolongada tiene un efecto inhibitorio en su crecimiento (fotoinhibición), siendo necesarios períodos de luz y oscuridad, repercutiendo esto en la producción de nutrientes y productividad del cultivo (Torzillo y Vonshak, 2013). En el estudio de Rosales Loaiza *et al.* (2007), recomiendan fotoperiodos de 12:12 horas para óptimos resultados; mientras, Sánchez *et al.* (2019), mencionan específicamente el suministro de 2000 lux, mediante la utilización de fuentes de luz artificial, con lámparas fluorescentes de 36 W en el mismo fotoperiodo.

Por su parte, la temperatura ejerce efectos en el desarrollo de las microalgas a nivel bioquímico, afecta las reacciones químicas y la fijación fotosintética de carbono a diferentes tipos de macromoléculas como proteínas, lípidos e hidratos de carbono. El rango ideal de temperatura oscila entre 18-25°C, pudiendo existir especies que se desarrollan fuera de este Converti *et al.* (2009); García *et al.* (2017). Existen estudios en donde se ha usado una temperatura de 28 ± 2 °C para las especies *Chroomonas* sp. y *Chlorella sorokiniana*, durante 25 días citepRosalesLoaiza2007; por otra parte, Sánchez *et al.* (2019) mantuvieron a *Chlorella vulgaris* a una temperatura similar a lo anteriormente citado 28 ± 1 °C.

El potencial hidrógeno (pH) es un parámetro importante en desarrollo de las microalgas, estas presentan una dependencia del pH del medio de cultivo, ubicándose su rango óptimo entre 7 y 9, y un aumento o descenso puede ser letal dependiendo de la especie (García *et al.*, 2017). El pH debe ser medido todos los días hasta que el cultivo alcance la fase estacionaria, lo cual se realiza con un pH-metro (Bermeo, 2011).

Adicionalmente las microalgas requieren nutrientes simples como N, P, K y otros de menor importancia como B, Cu, Mn, Se, Mo, Co, V y Se (Li *et al.*, 2008). El N es uno de los nutrientes más importantes para el desarrollo de las microalgas pero este se incorpora a manera de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+), además puede regular el contenido de lípidos ya que cuando el N_2 es limitante en el medio algal, los niveles de lípidos aumentan del 20 al 40% aproximadamente (Park *et al.*, 2011; Abdel-Raouf *et al.*, 2012).

SISTEMAS DE CULTIVO

Los sistemas de producción de microalgas se dividen en dos tipos: sistemas abiertos, como lagunas de estabilización tipo carrusel (Figura 1A) y contenedores; y sistemas cerrados, tanques tipo fermentador, fotobiorreactores o PBR (por sus siglas en inglés) tubulares, laminares y tipo hélice (Tredici, 2003; Hernández-Pérez y Labbé, 2014) (Figura 1. B, C, D y E).

Los cultivos abiertos son más difíciles de controlar que los cerrados: los primeros, como su nombre lo indica, están expuestos a la atmósfera siendo susceptibles a contaminación por hongos, bacterias o protozoos (Richmond, 1999), cambio de temperatura, fenómenos meteorológicos, etc.,

mientras que en los cerrados se pueden controlar todos estos parámetros (Valdivia *et al.*, 2012). En los últimos años se ha implementado con más frecuencia el uso de PBR los cuales tienen la ventaja de ser un sistema cerrado, pero generalmente presentan un elevado costo de inversión, mantenimiento y limpieza, sin embargo, dependiendo del fin a usarse se consideran como la mejor opción (Pires *et al.*, 2012).

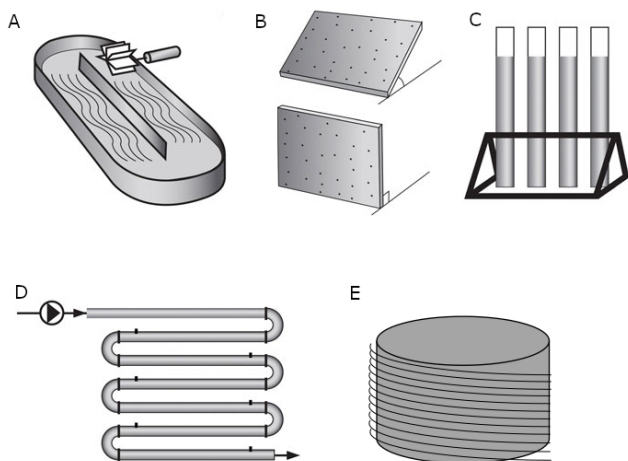


Fig. 1: Sistemas abiertos (A) y cerrados (B, C y D) de cultivo de microalgas: A) cultivo tipo carrusel, B) fotobiorreactor en paneles, C) y D) fotobiorreactores tubulares, E) fotobiorreactor en hélice. Modificado de Matsunanaga *et al.* (1999); Hernández-Pérez y Labbé (2014)

Contreras-Flores *et al.* (2003) recomiendan que para el diseño de PBR se tomen en cuenta algunos parámetros: (1) la trayectoria de la luz que debe ser pequeña, aproximadamente de 2,5 cm; (2) mantener una alta densidad celular (>8-15g/L); (3) realizar un mezclado vigoroso para asegurar ciclos de luz-oscuridad (L/O) de alta frecuencia; (4) usar tramos cortos de tubería (20-30 m) para evitar inhibición del crecimiento por acumulación de O_2 ; (5) evitar acumulación de sustancias inhibitorias, y (6) mantener las condiciones de temperatura y pH óptimos que han sido detallados anteriormente.

Además, es importante considerar el material a usar para la construcción de un PBR, siendo principalmente adecuado para los fotoperiodos. Los materiales apropiados deben carecer de toxicidad, poseer alta transparencia, alta resistencia mecánica, durabilidad (resistencia a la intemperie), estabilidad química y bajo costo. La facilidad de la limpieza es también otra cuestión operativa importante, que muchas veces incurre en altos costos (Tredici, 2003).

BIOFERTILIZANTES: UN LOGRO DE LA BIOTECNOLOGÍA

La biotecnología agrícola se enfoca en desarrollar tecnologías, procesos y productos para solucionar problemas de los productores (Amaro-Rosales *et al.*, 2016). El desarrollo de biofertilizantes y su implementación en la producción de cultivos disminuye el impacto ambiental de los fertilizantes sintéticos de uso convencional (Tejeda-Sartorius

et al., 2018), mejora la estructura del suelo, impulsa el aprovechamiento de la agricultura ecoamigable (Yasin *et al.*, 2015), potencia la nutrición de los cultivos (Robledo *et al.*, 2016), reducen los costos de producción y suprimen las enfermedades de las plantas (Singh, 2019).

Las microalgas son organismos ricos en carbohidratos, proteínas, lípidos, pigmentos y vitaminas (Spolaore *et al.*, 2006). La reproducción es rápida y de corto tiempo de generación por lo que se las utiliza en varias aplicaciones comerciales (Kurotani *et al.*, 2017), sin embargo el paso crítico en el cultivo de microalgas es el consumo de tiempo y energía (Batalha De Souza *et al.*, 2018). Estas características se han considerado importantes en la biotecnología de algas, la cual se ha desarrollado en los últimos años mediante técnicas de secuenciación genómica en relación a sus múltiples aplicaciones: en el campo de biofertilizantes lo que se ha buscado es mejorar la capacidad de fijar nitrógeno mediante modificaciones genéticas y modificar enzimas que estén envueltas en el metabolismo de fitohormonas de microalgas para usarlas como promotores de crecimiento de los cultivos (Renuka *et al.*, 2018).

Además, se ha enfocado en las propiedades físicoquímicas y estructurales secundarias de las secuencias de proteínas de algas verdes, rojas, glaucófitos, oomicetos, diatomeas y microalgas para crear la base de datos de Algal Protein Annotation Suite (Kurotani *et al.*, 2017). También ha acoplado la tecnología CRISPR/Cas9 como una herramienta versátil y útil para realizar la edición del genoma nuclear de forma económica y de alta eficiencia. En algas, la edición está enfocada en el gen APT para potenciarlo como marcador de preselección para la edición multiplexada o la interrupción de genes de interés (Guzmán-Zapata *et al.*, 2019).

SITUACIÓN ACTUAL DE LOS BIOFERTILIZANTES EN EL MUNDO

En los últimos años los biofertilizantes han ido ganando terreno comercial frente a los agroquímicos debido a la exigencia de la población de consumir productos orgánicos, obligando a los agricultores a usar productos amigables con el ambiente y consumidores (Dávila y Romero, 2017). Se estima que en 2020 las ventas mundiales de biofertilizantes y productos orgánicos lleguen a estar entre 5 mil y 8 mil millones anuales, siendo los mayores productores Estados Unidos, Brasil, China, India, Malasia y Sudáfrica (Dunham, 2016).

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2014) en Ecuador 396.619,68 hectáreas usan fertilizantes orgánicos o biofertilizantes, 2,67% en cultivos permanentes y 3,90% en transitorios. Por otra parte, el uso de fertilizantes químicos fue de 1'699.135,54 hectáreas, siendo el 48,08% en cultivos permanentes y 73,49% en transitorios. Esto ha variado con el paso del tiempo pero no ha mejorado: en la última actualización de INEC (2016) de la superficie sembrada con cultivos permanentes y transitorios en el 50,03% y 78,24% respectivamente se aplicaron insumos químicos, y solo en el 2,66% de la superficie cultivada con transitorios se usaron insumos orgánicos frente

al 2,04 % aplicado en permanentes.

Aunque en la actualidad los bioinsumos se encuentran formulados con base en investigación científica, persisten algunos factores limitantes en la producción de biofertilizantes de microalgas: la selección de la cepa y cosecha de microalgas, el diseño de biorreactores y la elección del sistema a usar para su producción a gran escala. En cuanto a la productividad, se espera que se mejoren técnicas de modificación genética de cepas para aumentar la producción de microalgas (biomasa) al doble, permitiendo así una producción eficaz y de bajo coste. Sin embargo, una forma de promover el desarrollo de la algacultura sería utilizando cepas conocidas que con sus propiedades físicas y fisiológicas sean resistentes a ciertos factores adversos (temperatura, pH, demanda química de oxígeno-DQO) y tengan un rápido crecimiento y producción (Barclay y Apt, 2013).

CONCLUSIONES

Las microalgas por sus características funcionales, su rápido crecimiento y facilidad de producción constituyen una nueva perspectiva de industrialización biológica mediante el desarrollo de biofertilizantes. La producción a gran escala de biofertilizantes utilizando microalgas es un proceso ecoamigable que brinda un producto que bioestimula el crecimiento de las plantas, sin llegar a contaminar el medio ambiente, siendo una alternativa orgánica en la producción de cultivos que garantiza la salud del productor y el consumidor al desarrollar productos libres de agroquímicos que son perjudiciales para la salud. Es factible continuar con la investigación en el campo de las microalgas para generar mayor información y utilizar estos productos no solo en la agricultura sino en diferentes ámbitos de aplicación como en la salud, la industria, en la formulación de cosméticos y en la alimentación de personas y animales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es parte del Proyecto CB001 “Biofertilizante a base de *Chlorella sp.* para la bioestimulación de cultivos Agrícolas” del Centro de Biotecnología de la Universidad Nacional de Loja.

REFERENCIAS

Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A., y Ibraheem, I. (2012, jul). Agricultural importance of algae. *African Journal of Biotechnology*, 11(54), 11648–11658. doi: 10.5897/AJB11.3983

Aghili, F., Jansa, J., Khoshgoftarmanesh, A. H., Afyuni, M., Schulin, R., Frossard, E., y Gamper, H. A. (2014). Wheat plants invest more in mycorrhizae and receive more benefits from them under adverse than favorable soil conditions. *Applied Soil Ecology*, 84, 93–111. doi: 10.1016/j.apsoil.2014.06.013

Amaro-Rosales, M., Gortari-Rabiela, R. D., y Departa. (2016). Innovación inclusiva en el sector agrícola mexicano : los productores de café en Veracruz. *Economía Informa*, 400, 86–104. doi: 10.1016/j.ecin.2016.09.006

Angulo, V., Sanfuentes, E., Rodríguez, F., y Sossa, K. (2014). Caracterización de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de *Eucalyptus nitens*. *Revista Argentina de Microbiología*, 338–347. doi: https://doi.org/10.1016/S0325-7541(14)70093-8

Barclay, W., y Apt, K. (2013, apr). Strategies for Bio-prospecting Microalgae for Potential Commercial Applications. En *Handbook of microalgal culture* (pp. 69–79). Oxford: John Wiley Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118567166.ch4

Batalha De Souza, M., Calijuri, M., Assemany, P., Castro, J., Carolina, A., y Martins De Oliveira, A. (2018). Soil applications of microalgae for the recovery of nitrogen: a life-cycle approach. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.097

Bermeo, L. (2011). Estudio de Cosechado de Cultivos de Microalgas en Agua Residual Mediante técnicas de Centrifugado. *Universidad de Cadiz*, 48.

Boraste, A., Vamsi, K. K., Jhadav, A., Khairnar, Y., Gupta, N., Trivedi, S., ... Joshi, B. (2009). Biofertilizers : A novel tool for agriculture. *International Journal of Microbiology Research*, 1(2), 23–31.

Camelo-Rusique, M., Moreno-Galván, A., Romero-Perdomo, F., y Bonilla-Buitrago, R. (2017). Desarrollo de un sistema de fermentación líquida y de enquistamiento para una bacteria fijadora de nitrógeno con potencial como biofertilizante. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(3), 289–296. doi: 10.1016/j.ram.2016.06.005

Castillo, G., Gregori, B., y Michelena, G. (2007). Bioproductos para la agricultura : surgimiento y desarrollo en el ICIDCA. (January).

Castro, J. d. S., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., Cecon, P. R., de Assis, I. R., y Ribeiro, V. J. (2017). Microalgae biofilm in soil: Greenhouse gas emissions, ammonia volatilization and plant growth. *Science of the Total Environment*, 574, 1640–1648. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.205

Chatterjee, A., Singh, S., Agrawal, C., Yadav, S., Rai, R., y Rai, L. C. (2017). Role of Algae as a Biofertilizer. , 189–200. doi: 10.1016/B978-0-444-63784-0.00010-2

Contreras-Flores, C., Peña-Castro, J. M., Flores-Cotera, L. B., y Cañizares-Villanueva, R. O. (2003). Avances en el Diseño Conceptual de Fotobiorreactores para el cultivo de Microalgas. *Interciencia*, 28(8), 450–456.

Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., y Del Borghi, M. (2009, jun). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146–1151. doi: 10.1016/J.CEP.2009.03.006

Coppens, J., Grunert, O., Hende, S. V. D., Vanhoutte, I., Boon, N., Haesaert, G., y Gelder, L. D. (2015). The use of microalgae as a high-value organic slow-release fertilizer results in tomatoes with increased carotenoid and sugar levels. doi: 10.1007/s10811-015-0775-2

Creus, C. M. (2017). Inoculantes microbianos : piezas de un rompecabezas que aún requiere ser ensamblado Microbial inoculants : Pieces of a puzzle that still needs to be assembled. *Revista Argentina de Microbiología*, 49(3), 207–209. doi: 10.1016/j.ram.2017.07.001

Criollo, P. J., y Obando, M. (2012). Efecto de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) asociadas a *Pennisetum clandestinum* en el altiplano cundiboyacense. doi: https://bit.ly/30ENJEO

Dávila, L., y Romero, M. (2017). *La situación actual de la sustitución de insumos agroquímicos por productos*

biológicos como estrategia en la producción agrícola: El sector florícola ecuatoriano (Tesis Doctoral no publicada).

- Dunham, W. (2016). *Global Biologicals Market Update March 2016-BPIA*.
- Egamberdiyeva, D., y Höflich, G. (2004). Effect of plant growth-promoting bacteria on growth and nutrient uptake of cotton and pea in a semi-arid region of Uzbekistan. *Journal of Arid Environments*, 56(2), 293–301. doi: 10.1016/S0140-1963(03)00050-8
- Elbert, W., Weber, B., Burrows, S., Steinkamp, J., Büdel, B., Andreae, M. O., y Pöschl, U. (2012, jul). Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 5(7), 459–462. doi: 10.1038/ngeo1486
- García, J., Pavía, M., García, T., Chirivella, J., y Serrano, A. (2017). Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas. *Nereis*, 9(9), 115–130.
- García-Orellana, Y., Soto, G., Tafur, V., Simbaña, A., Tello, E., y Brito, J. (2016). Efecto de un Fertilizante Orgánico Microalgal en la Germinación y Crecimiento de Plántulas de Albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 34, 33–39.
- González, M., Victoria, E., Merino, G., y Fernando, C. (2015). Efficiency of plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) in sugarcane.
- Grageda-Cabrera, O., Vera-Núñez, J., Aguilar-Acuña, J., Macías-Rodríguez, L., Aguado-Santacruz, G., y Peña-Cabriales, J. (2011). Fertilizer dynamics in different tillage and crop rotation systems in a Vertisol in Central Mexico. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 125–134. doi: 10.1007/s10705-010-9382-4
- Grageda-Cabrera, O. A., Vera-Núñez, J. A., y Peña-Cabriales, J. J. (2018). Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9, 281–289.
- Gupta, V., Kumar, S., Sood, A., Chaudhary, V., y Prasanna, R. (2013). New insights into the biodiversity and applications of cyanobacteria (blue-green algae) — Prospects and challenges. *Algal Research*, 2(2), 79–97. doi: 10.1016/j.algal.2013.01.006
- Guzmán-Zapata, D., Sandoval-Vargas, J. M., Macedo-Osorio, K. S., Salgado-Manjarrez, E., Castrejón-Flores, J. L., Oliver-Salvador, M. D. C., ... Badillo-Corona, J. A. (2019). Efficient editing of the nuclear APT reporter gene in *Chlamydomonas reinhardtii* via expression of a CRISPR-Cas9 module. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(5), 1–13. doi: 10.3390/ijms20051247
- Hernández-Pérez, A., y Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. doi: 10.4067/S0718-19572014000200001
- INEC. (2014). *Uso y Manejo de Agroquímicos en la Agricultura*.
- INEC. (2016). *Información Ambiental en la Agricultura*.
- Karthikeyan, N., Prasanna, R., Nain, L., y Kaushik, B. D. (2007). Evaluating the potential of plant growth promoting cyanobacteria as inoculants for wheat. , 43. doi: 10.1016/j.ejsobi.2006.11.001
- Kohler, H.-R., y Triebkorn, R. (2013, aug). Wildlife Ecotoxicology of Pesticides: Can We Track Effects to the Population Level and Beyond? *Science*, 341(6147), 759–765. doi: 10.1126/science.1237591
- Kurotani, A., Yamada, Y., y Sakurai, T. (2017). Alga-PrAS (Algal Protein Annotation Suite): A Database of Comprehensive Annotation in Algal Proteomes. *Plant Cell Physiology*, 58(1), e6. doi: 10.1093/pcp/pcw212
- Lauriano-Barajas, J., y Vega-Frutis, R. (2018). Infectivity and effectivity of commercial and native arbuscular mycorrhizal biofertilizers in seedlings of maize (*Zea mays*). *Botanical Sciences*, 96(3), 395–404. doi: 10.17129/botsci.1855
- Layne, G., y José, A. (2008). Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a rizobacterias promotoras del crecimiento y resistencia inducida a *Xanthomonas campestris*. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 20, 131–138.
- Li, Q., Du, W., y Liu, D. (2008, oct). Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 749–756. doi: 10.1007/s00253-008-1625-9
- Maestre, F., Bowker, M., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A., Cortina, J., Escolar, C., ... Martínez, I. (2011, dec). Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments*, 75(12), 1282–1291. doi: 10.1016/J.JARIDENV.2010.12.008
- Marks, E. A. N., Miñón, J., Pascual, A., Montero, O., Manuel, L., y Rad, C. (2017). Science of the Total Environment Application of a microalgal slurry to soil stimulates heterotrophic activity and promotes bacterial growth. *Science of the Total Environment*, 605-606, 610–617. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.169
- Matsunaga, T., Takeyama, H., y Takano, H. (1999). Algal Culture. En M. Flickinger y S. Drew (Eds.), *Bioprocess technology: Fermentation, biocatalysis, and bioseparation volumes 1-5* (1.ª ed., pp. 69–76). John Wiley Sons.
- McGriff, E., y McKinney, R. E. (1972, oct). The removal of nutrients and organics by activated algae. *Water Research*, 6(10), 1155–1164. doi: 10.1016/0043-1354(72)90015-2
- Moroney, J. V., y Ynalvez, R. (2009). Algal Photosynthesis. *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*(September). doi: 10.1002/9780470015902.a0000322.pub2
- Nagananda, Bhattacharya, S., y Kalpana. (2010). In vitro Studies on the Effects of Biofertilizers(*Azotobacter* and *Rhizobium*) on Seed Germination and Development of *Trigonella foenum-graecum* L. using a Novel Glass Marble containing Liquid Medium. *International Journal of Botany*, 394–403.
- Nain, L., Rana, A., Joshi, M., Jadhav, S. D., Kumar, D., Shivay, Y. S., ... Prasanna, R. (2010, jun). Evaluation of synergistic effects of bacterial and cyanobacterial strains as biofertilizers for wheat. *Plant and Soil*, 331(1-2), 217–230. doi: 10.1007/s11104-009-0247-z
- Park, J., Craggs, R., y Shilton, A. (2011, jan). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35–42. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2010.06.158
- Pires, J., Alvim-Ferraz, M., Martins, F., Simões, M., Pires, J., Alvim-Ferraz, M., ... Simões, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3043–3053. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.055
- Renuka, N., Guldhe, A., Prasanna, R., Singh, P., y Bux, F. (2018). Microalgae as multi-functional options in modern agriculture : current trends , prospects and challenges. *Biotechnology Advances*, 36(4), 1255–1273. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.04.004

- Restrepo-Correa, S. P., Pineda-Meneses, E. C., y Ríos-Osorio, L. A. (2017). Mecanismos de acción de hongos y bacterias empleados como biofertilizantes en suelos agrícolas : una revisión sistemática. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*, 18(2), 335–351. doi: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:635
- Richmond, A. (1999). Physiological principles and modes of cultivation in mass production of photoautotrophic microalgae. En *Chemicals from microalgae* (Zvi Cohen ed., p. 419). Taylor Francis.
- Robledo, M. T., Zavala, J. J. G., Jesús, H., Lugo, A., Ortiz, R. L., Montiel, N. O. G., ... Turrent, A. (2016). Biofertilización en híbridos de maíz androestériles y fértiles para los Valles Altos de México. *Terra Latinoamericana*, 35, 65–72.
- Rodríguez, A. A., Stella, A. M., Storni, M. M., Zulpa, G., y Zaccaro, M. C. (2006). Effects of cyanobacterial extracellular products and gibberellic acid on salinity tolerance in *Oryza sativa* L. , 4, 1–4. doi: [10.1186/1746-1448-2-7](https://doi.org/10.1186/1746-1448-2-7)
- Rosales Loaiza, N., Bermúdez, J., Moronta, R., y Morales, E. (2007). Gallinaza : un residual avícola como fuente alternativa de nutrientes para producción de biomasa microalgal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, IX(001), 41–48.
- Sahu, D., Priyadarshani, I., y Rath, B. (2012). Cyanobacteria as Potential Biofertilizer. *CIBTech Journal of Microbiology*, 1, 20–26.
- Sánchez, Y., Tobío, I., Romero, J., Díaz, Y., Melo, E., y Pílotto, R. (2019). Evaluación de las condiciones experimentales básicas para la producción de biomasa a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*. *Afinidad*(March), 63–69.
- Singh, R. (2019). *Microbial Biotechnology : A Promising Implement for Sustainable Agriculture*. Elsevier B.V. doi: [10.1016/B978-0-444-64191-5.00008-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00008-0)
- Spolaore, P., Joannis-cassan, C., Duran, E., Isambert, A., Génie, L. D., y Paris, E. C. (2006). Commercial Applications of Microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. doi: [10.1263/jbb.101.87](https://doi.org/10.1263/jbb.101.87)
- Tarakhovskaya, E. R., Maslov, Y. I., y Shishova, M. F. (2007, apr). Phytohormones in algae. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(2), 163–170. doi: [10.1134/S1021443707020021](https://doi.org/10.1134/S1021443707020021)
- Tejeda-Sartorius, O., Trejo-Téllez, L. I., Ríos-Barreto, Y., y O, J. L. R.-d. I. O. (2018). Mineral fertilization and biofertilization in physiological parameters of the orchid. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 24(3), 181–190. doi: [10.5154/r.rchsh.2017.07.027](https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2017.07.027)
- Torzillo, G., y Vonshak, A. (2013, apr). Environmental Stress Physiology with Reference to Mass Cultures. En *Handbook of microalgal culture* (pp. 90–113). Oxford: John Wiley Sons, Ltd. doi: [10.1002/9781118567166.ch6](https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch6)
- Tredici, M. R. (2003). Mass Production of Microalgae: Photobioreactors. En Amos Richmond (Ed.), *Handbook of microalgal culture* (pp. 178–214). Oxford: Blackwell Publishing Ltd. doi: [10.1002/9780470995280.ch9](https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch9)
- Trentacoste, E. M., Martínez, A. M., y Zenk, T. (2015, mar). The place of algae in agriculture: policies for algal biomass production. *Photosynthesis Research*, 123(3), 305–15. doi: [10.1007/s11120-014-9985-8](https://doi.org/10.1007/s11120-014-9985-8)
- Tripathi, R. D., Dwivedi, S., Shukla, M. K., Mishra, S., Srivastava, S., Singh, R., ... Gupta, D. K. (2008). Role of blue green algae biofertilizer in ameliorating the nitrogen demand and fly-ash stress to the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Chemosphere*, 70, 1919–1929. doi: [10.1016/j.chemosphere.2007.07.038](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.038)
- Valdivia, B., Benavente-Valdés, J., Montañez, J., Aguilar, C., y Méndez-Zavala, A. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 4(7).
- Vargas, Y. (2015, apr). Exposición a agroquímicos y creencias asociadas a su uso en la cuenca hidrográfica del Río Morote, Guanacaste, Costa Rica: Un estudio de casos. *Ciencia trabajo*, 17(52), 54–68. doi: [10.4067/S0718-24492015000100011](https://doi.org/10.4067/S0718-24492015000100011)
- Yasin, M., Ahmad, K., Mussarat, W., y Tanveer, A. (2015). Bio-fertilizers, substitution of synthetic fertilizers in cereals for leveraging agriculture. *Crop Environment*(January 2012), 62–66.