

1

Los biofertilizantes y su relación con la sostenibilidad agrícola

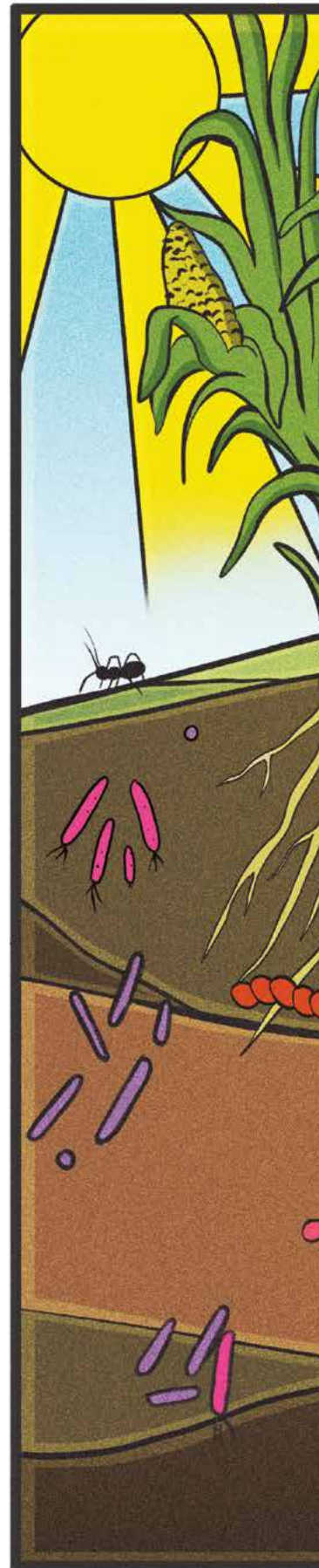
Raúl Osvaldo Pedraza¹

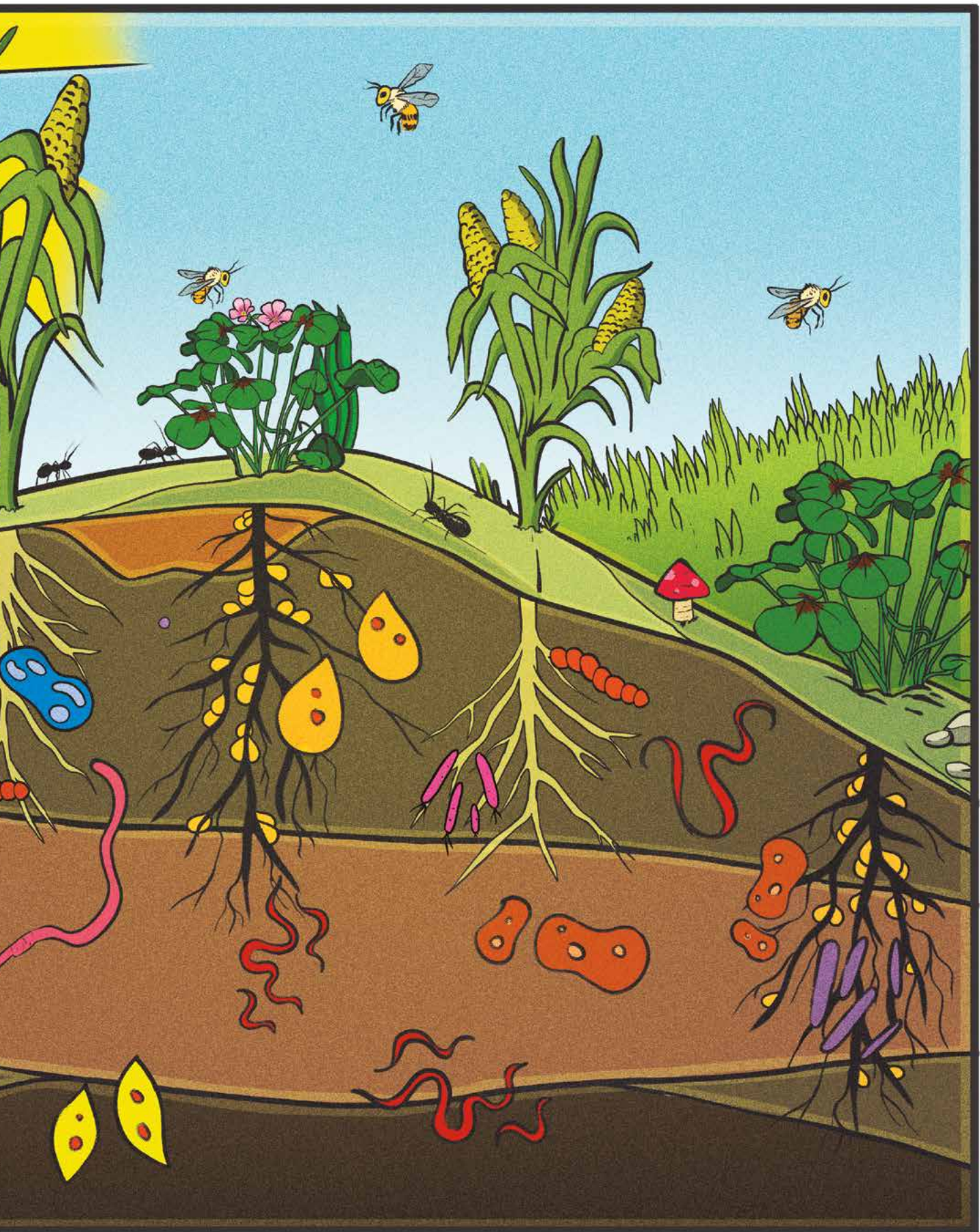
German Andrés Estrada Bonilla²

Ruth Rebeca Bonilla Buitrago²

1. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Argentina

2. Sistemas Agropecuarios Sostenibles. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA. Centro de Investigación Tibaitatá. Cundinamarca. Colombia.





Introducción

El aumento en la demanda de alimentos por parte de la creciente población mundial traza el mayor desafío para la agricultura en las próximas décadas: incrementar la producción de alimentos en la misma área agrícola, por lo que el suelo, como recurso finito, adquiere un papel relevante.

Los suelos saludables y productivos son fundamentales para lograr el desarrollo de una agricultura sostenible, por lo que permiten sustentar nuestros sistemas alimentarios, filtrar y regular el flujo de agua dulce, almacenar vastas cantidades de carbono y sostener a millones de organismos. Sin embargo, lamentablemente, los suelos del mundo están cada vez más presionados por la mala gestión en el uso de la tierra y por el cambio climático, entre otros factores. En este contexto, la adecuada nutrición de las plantas y la manutención de la salud del suelo son esenciales para la producción de cultivos y alimentos saludables que permitan satisfacer las necesidades de toda la población mundial futura.

Las actuales estrategias de manejo de suelos dependen principalmente de fertilizantes inorgánicos de síntesis química, que, cuando son utilizados inapropiadamente, causan una seria amenaza para la salud humana y ambiental, además de que son, en la mayoría de los casos, recursos finitos. Contrariamente a esto, los biofertilizantes han sido identificados como una alternativa biotecnológica para aumentar la fertilidad del suelo y la producción de cultivos en la agricultura sostenible. La utilización de microorganismos benéficos como biofertilizantes ha adquirido actualmente una importancia capital en el sector agrícola, debido a su papel potencial en la seguridad alimentaria y la producción sostenible de los cultivos (Itelima et al., 2018).

Un biofertilizante es una sustancia o producto que contiene microorganismos vivos y que, al ser aplicado al suelo, las semillas o las raíces de las plantas, coloniza la rizósfera y promueve el crecimiento vegetal a través del incremento de la provisión o disponibilidad de nutrientes para la planta (Vessey, 2003). Básicamente, un biofertilizante es un producto que contiene cepas seleccionadas de microorganismos benéficos del suelo o de la planta, cultivadas artificialmente en laboratorio y formuladas en soportes adecuados que mejoran la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos (Mazid & Khan, 2015). En un sentido amplio, dicho término puede abarcar todos los recursos orgánicos que se utilicen de diferentes fuentes y formas para el crecimiento de las plantas, al estar disponibles para estas (Khosro & Yousef, 2012).

Distintos microorganismos benéficos han sido utilizados como biofertilizantes desde hace mucho tiempo. El conocimiento de la aplicación de inóculo microbiano data de mucho tiempo atrás y pasa de generación en generación entre los agricultores. Comenzó con el cultivo a pequeña escala con la aplicación de compost, lo que demostró su capacidad de actuar como biofertilizante (Khosro & Yousef, 2012). Este efecto se reconoce cuando los microorganismos aceleran la descomposición de los residuos orgánicos y los subproductos agrícolas a través

■ **Tabla 1.1.** Clasificación de algunos biofertilizantes

Fuente: Elaboración propia con base en Itelima et al. (2018)

1	Biofertilizantes fijadores de nitrógeno Microorganismos: <i>Rhizobium</i> spp., <i>Azospirillum</i> spp., <i>Herbaspirillum</i> spp. y <i>Azotobacter</i> spp. Actividad/efecto: Fijan el N ₂ del aire y lo convierten en formas orgánicas disponibles para las plantas.	5	Biofertilizantes solubilizadores de potasio Microorganismos: <i>Bacillus</i> spp. y <i>Aspergillus niger</i> Actividad/efecto: Solubilizan silicatos y producen, así, ácidos orgánicos, lo que deja disponible el K para las plantas.
2	Biofertilizantes solubilizadores de fosfatos Microorganismos: <i>Bacillus</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp. y <i>Herbaspirillum</i> spp. Actividad/efecto: Solubilizan y mineralizan formas insolubles de P en el suelo.	6	Biofertilizantes movilizadores de potasio Microorganismos: <i>Bacillus</i> spp. Actividad/efecto: Movilizan formas inaccesibles de potasio (silicatos) en el suelo.
3	Biofertilizantes movilizadores de fósforo Microorganismos: Micorrizas Actividad/efecto: Captan fosfatos de las capas del suelo y movilizan P insoluble en el suelo al que se aplican.	7	Biofertilizantes oxidantes de azufre Microorganismos: <i>Thiobacillus</i> spp. Actividad/efecto: Oxidan el S a sulfatos que son utilizables por parte de las plantas.
4	Biofertilizantes promotores del crecimiento de las plantas Microorganismos: <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Azospirillum</i> spp. y <i>Herbaspirillum</i> spp. Actividad/efecto: Producen hormonas y metabolitos que favorecen el crecimiento de la raíz, lo que aumenta la captación de agua y nutrientes del suelo.		

de diversos procesos que dan como resultado productos saludables (Sánchez et al., 2017). La historia comercial de los biofertilizantes comenzó con el lanzamiento de Nitragin por Nobbe y Hilther en 1895. A esto le siguió el descubrimiento del género *Azotobacter*, de las algas verdeazuladas y de otros microorganismos que se están utilizando hasta la fecha como biofertilizantes (Itelima et al., 2018). Muchas veces, el término *biofertilizante* se confunde con el de *fertilizante orgánico*; sin embargo, técnicamente, hay una gran diferencia entre ellos. Deshwal y Chaubey (2014) señalan, por un lado, que los biofertilizantes son inoculantes microbianos que consisten en células vivas

de microorganismos como bacterias, algas y hongos — solos o combinados— que pueden ayudar a aumentar la productividad de los cultivos. En dichos casos, las actividades biológicas son notablemente mejoradas por las interacciones microbianas que se establecen en la rizósfera de las plantas. Por el otro lado, los fertilizantes orgánicos son los que se obtienen de fuentes animales, como el estiércol animal, o vegetales, como los residuos verdes.

La tabla 1.1 muestra la clasificación de algunos biofertilizantes, con ejemplos de microorganismos que los incluyen, y la actividad/efecto que proporcionan.



Sabemos que las prácticas agrícolas son determinantes del nivel de producción de alimentos y, principalmente, las responsables del estado de nuestro medio ambiente (Tilman et al., 2002). Por lo tanto, el escenario mundial actual exige no solo que la productividad de los cultivos sea aumentada para cubrir las necesidades de la creciente población, sino también que sea realizada de manera sostenible, de modo que prometa una mayor seguridad social, económica y ambiental. Para lograr tales objetivos, los investigadores deben esforzarse en identificar estrategias innovadoras para la productividad sostenible de los cultivos y en generar una mayor eficiencia de los insumos, además de asegurar la protección de los recursos naturales remanentes y de los agroecosistemas (Germer et al., 2011). No debemos olvidar que la sostenibilidad se basa en el hecho de que los recursos no deben utilizarse a velocidades superiores a la capacidad de la Tierra para sustituirlos (Godfray et al., 2010).

Este capítulo —así como los subsiguientes— tiene como objetivo revisar el papel actual de los biofertilizantes en la agricultura sostenible, para, así, satisfacer las necesidades cognitivas de los productores y de los profesionales vinculados a la agricultura.

Fertilizantes de síntesis química vs. biofertilizantes

Los fertilizantes inorgánicos de síntesis química son mundialmente utilizados porque son fácilmente asequibles y tienen la ventaja de una rápida acción debido a su inmediata liberación de nutrientes. Sin embargo, se ha investigado sobre las desventajas de tales fertilizantes y se ha revelado que estas no pueden pasarse por alto. La mayoría de los problemas asociados a los cultivos cosechados y parte de la contaminación de nuestro entorno natural se producen como resultado del uso inapropiado de fertilizantes inorgánicos (Ge et al., 2018). Los estudios han demostrado que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en algunas condiciones climáticas provoca la emisión de óxido nitroso, que tiene un efecto de calentamiento global potencial 296 veces mayor que el de una masa igual de dióxido de carbono (Gruber & Galloway, 2008). Por otro lado, Zhang et al. (2016) observaron que en los últimos 110 años las emisiones globales de metano del cultivo de arroz aumentaron un 85%. La expansión de los campos de arroz fue el factor dominante para las tendencias crecientes en las emisiones de metano, seguido de una concentración elevada de dióxido de carbono y el uso de fertilizantes nitrogenados. Estos hallazgos han impulsado la necesidad de proporcionar un fertilizante respetuoso con el medio ambiente conocido como *biofertilizante*.

La demanda mundial de fertilizantes ha aumentado mucho en las últimas décadas. Según el Banco Mundial, la demanda de fertilizantes de síntesis química en Colombia se estima en $659 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La mayoría de los fertilizantes utilizados en Colombia son importados (figura 1.1), y debido al alto costo de importación y a la volatilidad del dólar estadounidense, el rubro de fertilización se vuelve muy costoso, lo que impide que los agricultores con pocos recursos económicos puedan acceder a ellos ("Colombia - Consumo de fertilizantes", 2017).

Aparte de su alto costo, cuando se aplican de manera incorrecta, excesiva o inoportuna, los fertilizantes inorgánicos de síntesis química tienen efectos negativos. Se conoce que la aplicación excesiva de fertilizantes conduce a daños por acumulación de

sales, y en la mayoría de los casos esto lleva a la muerte de plantas jóvenes (Almeida Machado & Serralheiro, 2017). Debido a que una gran mayoría de los fertilizantes de síntesis no son biodegradables, su uso a largo plazo produce la acumulación de sustancias nocivas y la acidificación/salinización del suelo, lo que provoca una disminución de la fertilidad química y biológica de este (Taylor, 1997). Debido a su alta solubilidad en el agua, muchos de estos fertilizantes podrían ser lixiviados profundamente en el suelo (donde las raíces de las plantas no los pueden alcanzar) y en el agua subterránea, lo que causa contaminación (Almeida Machado & Serralheiro, 2017). Sin embargo, gran parte de estos problemas pueden evitarse con el uso de fertilizantes que respeten el ambiente donde son aplicados; tal es el caso de los biofertilizantes.

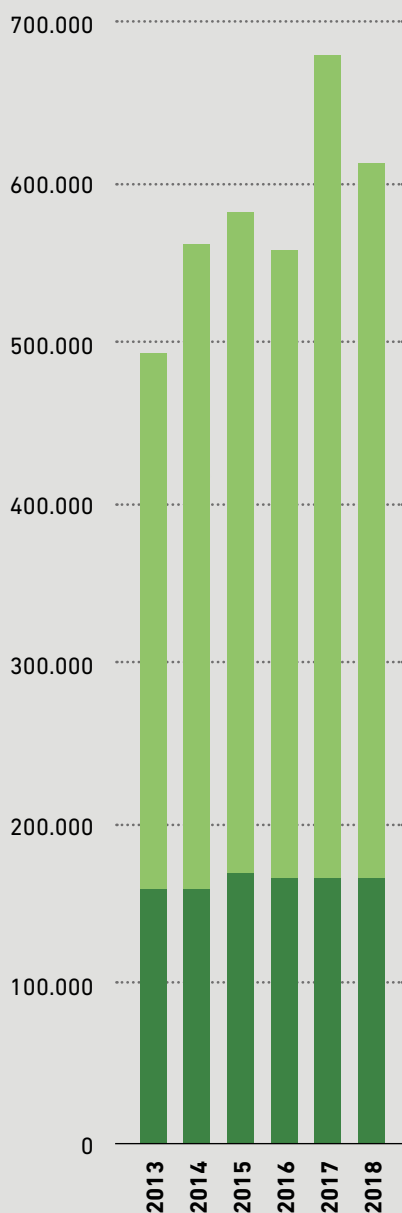
Los biofertilizantes son amigables con el medio ambiente, y el riesgo de contaminación es muy bajo, a diferencia de los fertilizantes de síntesis, que a menudo se trasladan hacia cuerpos de agua a los que les pueden ocasionar eutrofización y en los humanos causa el "síndrome del bebé azul" (metahemoglobinemia adquirida) cuando el nivel de nitrato está por encima de 10 mg L^{-1} (Knobeloch et al., 2000). Además, se ha encontrado que los biofertilizantes ayudan a controlar enfermedades de las plantas, como la podredumbre de la raíz, causada por *Pythium*; la pudrición de la raíz, causada por *Rhizoctonia*; el marchitamiento por frío, y nematodos parásitos (Mahimaraja et al., 2008). El control de enfermedades con biofertilizantes se ha atribuido a distintos posibles mecanismos, como la competencia exitosa por nutrientes, la producción de antibióticos, la depredación exitosa de patógenos y la activación de genes resistentes a enfermedades (Liu et al., 2017). Sin embargo, también existe la posibilidad de utilizar conjuntamente fertilizantes de síntesis química y biofertilizantes, pues, aplicados correctamente, podrían provocar un aumento en la producción agrícola y mejorar la calidad microbiológica del suelo, debido a que así se pueden reducir las dosis de fertilizantes síntesis y mejorar su aprovechamiento por efecto de la actividad microbiana de los biofertilizantes.

■ **Figura 1.1.** Origen de los fertilizantes nitrogenados y fosfatados consumidos en Colombia, 2013-2017.

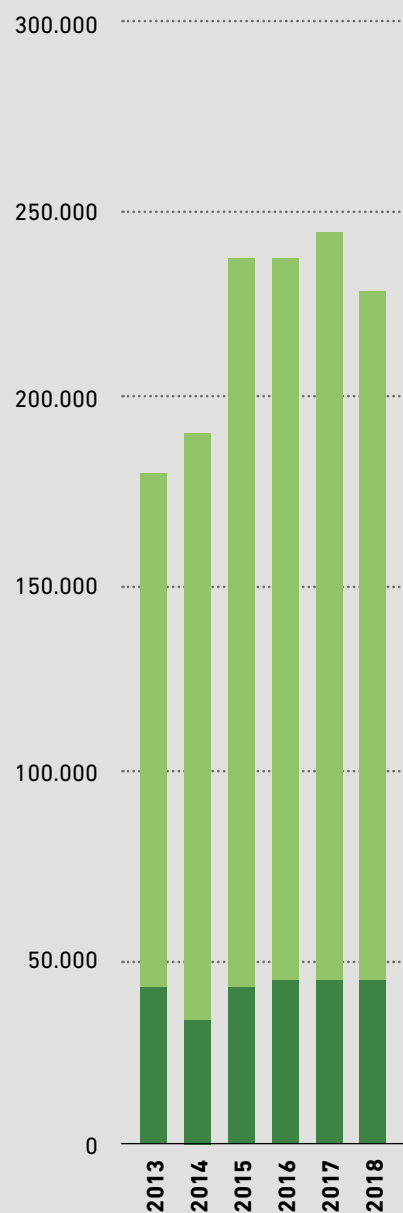
Fuente: Faostat: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>



**Toneladas
(N)**



**Toneladas
(P₂O₅)**



■ Producción

■ Importación

La rizósfera: zona de interacciones

Dentro de los ecosistemas terrestres, una gran proporción de diversos organismos se encuentran en forma subterránea; allí desempeñan distintos y numerosos papeles en los servicios que brindan a los ecosistemas (Uzoh & Babalola, 2018). Se sabe que los microorganismos son importantes impulsores en el funcionamiento del ecosistema y de su sostenibilidad, teniendo en cuenta que la diversidad de ellos es extremadamente grande y que sus funciones también son diversas (Dighton, 2014). La actual demanda de un rendimiento sostenible y mayor de los cultivos ha revitalizado el estudio de los microorganismos que habitan en el suelo.

La rizósfera, definida por primera vez hace más de un siglo por Lorentz Hiltner (1904) y redefinida por Philippot et al. (2013), es la zona angosta del suelo que rodea y está influenciada por las raíces de las plantas; esta zona alberga una abrumadora cantidad de microorganismos e invertebrados y se considera una de las interfaces más dinámicas de la Tierra. Hay tres zonas distintas en la rizósfera: la endorrizósfera (región del tejido cortical de la raíz), el rizoplaneo (que abarca la epidermis de la raíz y el mucílago asociado) y la ectorrizósfera (el suelo más cercano a la raíz). En este ambiente, las interacciones entre las raíces de las plantas, el suelo y los microorganismos alteran significativamente las propiedades físicas y químicas del suelo, lo que a su vez altera la población microbiana en la rizósfera (Nihorimbere et al., 2011). Adicionalmente, los exudados de las raíces de las plantas median las interacciones entre estas raíces y las comunidades microbianas en la rizósfera (Chaparro et al., 2013). Las raíces de las plantas liberan del 20 al 40 % del carbono fijado fotosintéticamente como azúcares solubles, aminoácidos o metabolitos secundarios (Grayston et al., 1996), y estos son utilizados por las comunidades microbianas en la rizósfera.

Los exudados de raíz se han agrupado en dos clases: compuestos de bajo peso molecular, como aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares, compuestos fenólicos y otros metabolitos secundarios, y compuestos de alto peso molecular, como polisacáridos y proteínas (Badri &

Vivanco, 2009). La composición cualitativa y cuantitativa de los exudados radiculares está determinada por el cultivar, la especie de la planta, su etapa de desarrollo y diversos factores ambientales, incluidos el tipo de suelo, el pH, la temperatura y la presencia de microorganismos (Badri & Vivanco, 2009). Estas diferencias generan en la rizósfera comunidades microbianas que tienen un cierto grado de especificidad para cada especie de planta.

El suelo también influye en la planta y en la supervivencia microbiana. Además, los microorganismos determinan la fertilidad del suelo, por lo que influyen en el rendimiento de la planta. Según Chaparro et al. (2014), ahora se sabe que la planta modifica el microbioma en el entorno inmediato del suelo, así como la abundancia microbiana en la rizósfera; por lo tanto, las especies de plantas soportan una población microbiana única (Bais et al., 2006). El microbioma resultante es, pues, un producto de las diferencias en el tipo de exudados radiculares (Rasmann & Turlings, 2016) y de las tasas de captación de nutrientes por parte de las plantas (Bell et al., 2015). De lo anterior se desprende que todos los aspectos de las prácticas agrícolas requieren una mejor comprensión de los procesos de la rizósfera que faciliten el crecimiento de las plantas y la supresión de enfermedades. Así, estudiar la relación intrincada entre cultivos, suelos y microbios en la rizósfera es fundamental y necesario para mantener sistemas de producción saludables y de alto rendimiento.

En el pasado, el fitomejoramiento y los estudios microbianos se llevaban a cabo como entidades separadas, pero en los últimos tiempos la estrecha asociación de plantas y microorganismos se considera un nicho ecológico unificado conocido como *holobionte* (Vandenkoornhuyse et al., 2015). Las variaciones en los rasgos genéticos y fenotípicos de las plantas que sostienen el microbioma y que son beneficiosos para estas ofrecen una ventaja de aptitud física, por lo que la capacidad de la planta para mantener el microbioma beneficioso es un rasgo que debe seleccionarse en el fitomejoramiento (Uzoh & Babalola, 2018). Los

beneficios derivados del microbioma deben reemplazar al carbono y la energía que se obtienen de la planta. Se cree que el holobionte pudo haber sido la unidad seleccionada para guiar la evolución hacia los rasgos de las plantas que apoyaban el microbioma favorable, lo que constituye una nueva área de investigación, dado que el estudio holístico y mecanicista de las interacciones es muy pertinente. Así, se debe estudiar y diseñar toda la comunidad microbiana involucrada en la mejora del crecimiento y el desarrollo de un genotipo de planta específico, en un ambiente específico, bajo ciertas condiciones de manejo, para lograr un aumento de rendimiento máximo sostenible (Uzoh & Babalola, 2018). De esta manera, la producción de un biofertilizante ya no debería considerar una cepa de un microorganismo beneficioso, sino un consorcio de agentes biológicos específicos para cada uno o para grupos de genotipos de plantas bajo ciertas condiciones ambientales. La nueva área de investigación debe ser la producción de inóculo microbiano específica en el sitio y debe abordar los problemas específicos del suelo, que podrían incluir deficiencias y fijaciones de nutrientes, peligros y adaptaciones ambientales y resistencia a patógenos. Dicho consorcio microbiano debería ser adaptable para coexistir dentro de la rizósfera (Uzoh & Babalola, 2018).

Según Huang et al. (2014), en lugar de identificar qué microbios están presentes en la rizósfera, se debería identificar lo que están haciendo, pues esto proporcionaría más información sobre estas interacciones complejas. Más aún, la identificación de los compuestos presentes en los exudados de la raíz, que influyen en la estructura y la función de la comunidad microbiana del suelo, ayudaría a construir estrategias novedosas para mejorar el rendimiento de las plantas y para aumentar el rendimiento y la sostenibilidad de los cultivos.

Existe una gran cantidad de bibliografía que demuestra que las interacciones rizosféricas en el nivel uno a uno (planta-microbio) están mediadas directa o indirectamente por los exudados de la raíz (Uzoh & Babalola, 2018). Sin embargo, los desarrollos recientes en la tecnología de secuenciación de nueva generación les han permitido a los investigadores estudiar estas interacciones a nivel comunitario (Huang et al., 2014). Estos estudios se han centrado principalmente en identificar qué tipos de microbios están presentes en los diferentes ambientes.

Asimismo, se requieren estudios para analizar estas interacciones en el nivel funcional, para identificar las señales involucradas en las interacciones entre especies. La mayoría de los estudios analizan cómo los exudados de las raíces de las plantas atraen y regulan estas interacciones microbianas, pero se carece de conocimientos sobre cómo los microbios específicos modulan estas interacciones, especialmente a nivel comunitario, y sobre cómo las comunidades microbianas asociadas a las raíces influyen en la exudación de las raíces de las plantas (Huang et al., 2014).

Se necesita más investigación para identificar los factores microbianos que influyen en el proceso de exudación de la raíz del huésped, lo que, sin duda, ayudará a desarrollar estrategias mediadas por los microorganismos para manipular la exudación de la raíz de la planta y, a su vez, las comunidades microbianas en la rizósfera.

Microorganismos utilizados como biofertilizantes

El desarrollo de los biofertilizantes es una historia de éxito de la microbiología del suelo en su búsqueda por proporcionarles una fuente sostenible y efectiva de nutrientes a las plantas, particularmente con respecto a la fijación biológica de nitrógeno. Los microorganismos más antiguamente utilizados como biofertilizantes son los llamados *rizobios*, conocidos como diazótrofos por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico. Este grupo de bacterias es capaz de colonizar la rizósfera y de establecer nódulos en las raíces de las plantas hospederas, principalmente de especies de la familia Fabaceae. La simbiosis fabáceas-*rizobio* por medio del proceso de fijación biológica de nitrógeno puede llegar a suplir hasta el 100 % de la demanda de N en algunas especies vegetales (Hungria et al., 2017). Otro grupo de bacterias diazotróficas ampliamente usadas como principio activo en biofertilizantes son las pertenecientes al género *Azospirillum*, que establecen relaciones menos directas con la planta huésped, pues consiguen reemplazar hasta el 50 % de la fertilización nitrogenada en algunos cultivos.

La gran mayoría de los primeros biofertilizantes comercializados contenían solo una cepa microbiana, seleccionada en ensayos *in vitro*, la cual generalmente permitía los mejores resultados de inoculación en un cultivo en particular. Actualmente, cada vez se populariza más el desarrollo de biofertilizantes con diferentes cepas o inoculantes mixtos; su enfoque se basa en promover el crecimiento de las plantas mediante la combinación de distintos mecanismos de diferentes microorganismos. Los biofertilizantes con más de una cepa han mostrado excelentes resultados y

tienen el potencial de utilizarse cada vez más por parte de los agricultores (Sanches Santos et al., 2019).

Los microorganismos mencionados anteriormente, entre otras bacterias diazotróficas y no diazotróficas, se denominan *bacterias promotoras del crecimiento de las plantas* (PGPB, por sus siglas en inglés: *plant growth promoting bacteria*) o *rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal* (PGPR, por sus siglas en inglés: *plant growth promoting rhizobacteria*), debido a su capacidad de ejercer efectos benéficos sobre el desarrollo de diferentes especies vegetales, ya sea por medio de mecanismos directos o indirectos (Glick, 2012). Estos microorganismos pueden optimizar el ciclaje de nutrientes en el suelo, con lo cual aumenta su disponibilidad y mejora la nutrición de las plantas; con este enfoque es posible reducir la fertilización mineral de síntesis (Adesemoye & Kloepper, 2009). Dependiendo del estado fisiológico del cultivo, los biofertilizantes pueden inducir el crecimiento de la planta por medio de mecanismos como la producción de fitohormonas (auxinas, ácido abscísico, citocininas, etileno y giberelinas), la solubilización de fosfatos, la producción de sideróforos y la inducción de la resistencia sistémica intrínseca de la planta al estrés biótico, entre otros (Malusá & Vassilev, 2014; Saad et al., 2020). Otros tipos de microorganismos son cada vez más demandados debido a su uso en la agricultura para el control biológico de plagas y enfermedades (Berg et al., 2017); no obstante, este libro abordará los biofertilizantes que promueven el crecimiento de las plantas. Todos serán denominados *microorganismos PGPB*, con diferentes mecanismos de acción, y los contenidos estarán basados en nuestras experiencias sobre este tópico.



Ventajas y limitaciones de los biofertilizantes

Los biofertilizantes desempeñan un papel importante en la mejora de la fertilidad del suelo. Además, la aplicación al suelo mejora su estructura y elimina el uso exclusivo de fertilizantes de síntesis química. En el trabajo de revisión realizado por Bhattacharjee y Dey (2014) se indica que, bajo condiciones de tierra baja, la aplicación de algas verdeazuladas más *Azospirillum* demostró ser significativamente beneficiosa para mejorar el rendimiento de grano de arroz. Asimismo, la aplicación de biofertilizantes a base de *Azotobacter*, *Rhizobium* o micorrizas arbusculares produjo el mayor aumento en la producción de paja y grano en plantas de trigo tratadas con roca fosfórica como fertilizante fosfatado. El estudio también señala que la producción y aplicación del alga *Azolla*, además de ser económica y ecológica, proporciona beneficios en términos de enriquecimiento de carbono y nitrógeno del suelo. Respecto al nitrógeno, los autores observan que los distintos géneros y especies bacterianas que fijan nitrógeno simbióticamente podrían

cubrir entre el 80 y el 90% de la demanda de este nutriente en plantas de soya.

El control biológico, un enfoque moderno en el manejo de enfermedades, es un papel importante que también pueden desempeñar los fertilizantes biológicos en la agricultura. Así, por ejemplo, se ha encontrado que los biofungicidas basados en *Trichoderma* prometen controlar la podredumbre de la raíz de frijol mungo (Bhattacharjee & Dey, 2014). Igualmente, también se ha observado un aumento significativo en los parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad de ciertas plantas tratadas con biofertilizantes que contienen bacterias fijadoras de nitrógeno y bacterias solubilizadoras de fosfatos y potasio (Khosro & Yousef, 2012).

Entre las ventajas que ofrecen los biofertilizantes debido a los microorganismos benéficos que contienen, se destacan las siguientes:



Secreción de hormonas de crecimiento de las plantas.



Protección de las plantas contra el ataque de patógenos.



Mejora de la fertilidad del suelo.



Posible uso sin necesidad de habilidades especiales.



Reducción o eliminación del uso de fertilizantes químicos.



Rentabilidad en comparación con los fertilizantes sintéticos, pues son más económicos.



Restauración del ciclo natural de nutrientes del suelo y generación de materia orgánica en el suelo.



Protección contra la sequía.

No obstante los numerosos beneficios de la incorporación de los biofertilizantes en los sistemas agrícolas, se han informado ciertos obstáculos en el uso de estos bioinsumos, lo que reduce su aceptación entre los agricultores. La variabilidad de los resultados experimentada en el campo puede deberse a relaciones inespecíficas entre el huésped y el inoculante, a las

diferentes condiciones físicas y químicas edáficas, a la poca capacidad competitiva del biofertilizante contra las cepas nativas y a deficiencias en la obtención de una adecuada formulación (Lucy et al., 2004). También se señala que la limitación más importante de los biofertilizantes es su contenido de nutrientes, en comparación con los fertilizantes inorgánicos, lo que

podría dar lugar a síntomas de deficiencia nutricional en las plantas. No obstante, este problema puede ser reducido mediante la adición de desechos ricos en nutrientes, como harina de huesos (rica en fósforo), ceniza de madera, residuos de palma (ricos en potasio) u otras sustancias de origen natural, como compost con roca fosfórica, para enriquecer el fertilizante (Masuco Lopes et al., 2021). Mahimaraja et al. (2008) observaron que la adición de fósforo a los desechos vegetales hace que el biofertilizante sea más equilibrado y que disminuyan las pérdidas de nitrógeno. Adicionalmente, y considerando que los biofertilizantes poseen muchos aspectos positivos, su uso a veces no puede llevar a los resultados positivos esperados, posiblemente debido a su exposición a altas temperaturas o a condiciones hostiles antes del uso. El biofertilizante debe almacenarse a temperatura ambiente o en condiciones de almacenamiento en frío, alejado del calor o la luz solar directa. Otros factores que pueden limitar las propiedades de los biofertilizantes son el medio ambiente, los recursos humanos, el desconocimiento y la falta de disponibilidad tanto de cepas como de portadores adecuados, entre otros

(Bhattacharjee & Dey, 2014). La vida útil corta, la falta de material portador adecuado, la susceptibilidad a altas temperaturas, el transporte y el almacenamiento son cuellos de botella para los biofertilizantes que aún deben resolverse para obtener una inoculación efectiva. En la tabla 1.2 se presentan algunas de las limitaciones para el uso de los biofertilizantes, con sus correspondientes observaciones.

La ecología microbiana del suelo aparece como un complejo y mayormente desconocido escenario donde tienen lugar todas estas interacciones entre los microorganismos y las plantas. Por lo tanto, el estudio de la ecología microbiana del suelo y de su dinámica sin duda mejorará el desarrollo de nuevas y mejores tecnologías de biofertilizantes para el futuro de la agricultura. Debido a que las mismas funciones o mecanismos de promoción del crecimiento de las plantas pueden ser realizados por muchos microorganismos diferentes, es de esperar que esta redundancia funcional en la diversidad microbiana del suelo pueda ser manejada a favor del desarrollo vegetal (Wall, 2015).

■ **Tabla 1.2.** Limitaciones para el uso de biofertilizantes

Fuente: Elaboración propia con base en Bhattacharjee y Dey (2014)

1	Falta de disponibilidad de cepas adecuadas Observaciones: Es una de las principales limitaciones en la producción de biofertilizantes. Las cepas seleccionadas deben ser capaces de sobrevivir en el portador del inóculo, colonizar rápidamente al hospedero y competir exitosamente con los factores bióticos y abióticos del ambiente.	3	Falta de conocimiento de los agricultores Observaciones: No todos los agricultores conocen los biofertilizantes y su utilidad para aumentar el rendimiento de los cultivos. Además, no todos son conscientes de los daños que causa la aplicación continua e inapropiada de fertilizantes inorgánicos en el ecosistema.
2	Falta de disponibilidad de un portador adecuado Observaciones: Si no se dispone del portador adecuado, es difícil mantener la vida útil del biofertilizante.	4	Recursos humanos inadecuados y personal inexperto Observaciones: En muchas ocasiones, los agricultores no calificados y el personal inexperto no reciben instrucciones adecuadas sobre la aplicación de los biofertilizantes.
		5	Restricciones ambientales Observaciones: El uso de los biofertilizantes es afectado por las características del suelo, como salinidad, acidez, sequía, etc.

Referencias

- Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2196-0>
- Almeida Machado, R. M., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3(2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030>
- Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell & Environment*, 32(6), 666-681. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.01926.x>
- Bais, H. P., Weir, T. L., Perry, L. G., Gilroy, S., & Vivanco, J. M. (2006). The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57(1), 233-266. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159>
- Bell, T. H., Cloutier-Hurteau, B., Al-Otaibi, F., Turmel, M.-C., Yergeau, E., Courchesne, F., & St-Arnaud, M. (2015). Early rhizosphere microbiome composition is related to the growth and Zn uptake of willows introduced to a former landfill. *Environmental Microbiology*, 17(8), 3.025-3.038. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12900>
- Berg, G., Köberl, M., Rybakova, D., Müller, H., Grosch, R., & Smalla, K. (2017). Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. *FEMS Microbiology Ecology*, 93(5). <https://doi.org/10.1093/femsec/fix050>
- Bhattacharjee, R., & Dey, U. (2014). Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 8(24), 2.332-2.342. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6374>
- Chaparro, J. M., Badri, D. V., Bakker, M. G., Sugiyama, A., Manter, D. K., & Vivanco, J. M. (2013). Root exudation of phytochemicals in arabidopsis follows specific patterns that are developmentally programmed and correlate with soil microbial functions. *PLoS ONE*, 8(2), artículo e55731. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055731>
- Chaparro, J. M., Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2014). Rhizosphere microbiome assemblage is affected by plant development. *The ISME Journal*, 8(4), 790-803. <https://doi.org/10.1038/ismej.2013.196>
- Colombia - Consumo de fertilizantes. (2017). *Index Mundi*. [https://www.indexmundi.com/es/datos/colombia/consumo-de-fertilizantes#:~:text=Consumo%20de%20fertilizantes%20\(kilogramos%20por,Colombia%20fue%20659.45%20en%202016](https://www.indexmundi.com/es/datos/colombia/consumo-de-fertilizantes#:~:text=Consumo%20de%20fertilizantes%20(kilogramos%20por,Colombia%20fue%20659.45%20en%202016)
- Deshwal, V. K., & Chaubey, A. (2014). Isolation and characterization of *Rhizobium leguminosarum* from root nodule of *Pisum sativum* L. *Journal of Academic Industrial Research*, 2(2), 2.278-5.213.
- Dighton, J. (2014). Introduction: Soils and their promotion of plant growth. En J. Dighton, & J. A. Krumins (eds.), *Interactions in soil: Promoting plant growth* (pp. 1-26). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8890-8_1
- Ge, S., Zhu, Z., & Jiang, Y. (2018). Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(1), 282-293. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001002>
- Germer, J., Sauerborn, J., Asch, F., de Boer, J., Schreiber, J., Weber, G., & Müller, J. (2011). Skyfarming an ecological innovation to enhance global food security. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 6(2), artículo 237. <https://doi.org/10.1007/s00003-011-0691-6>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, artículo 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5.967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Grayston, S. J., Vaughan, D., & Jones, D. (1996). Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: The importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied Soil Ecology*, 5(1), 29-56. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(96\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(96)00126-6)
- Gruber, N., & Galloway, J. N. (2008). An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*, 451, 293-296. <https://doi.org/10.1038/nature06592>
- Hiltner, L. (1904). Über neuere erfahrungen und probleme auf dem debiete der bo denbakteriologie und unter besonderer berucksichtigung der grundund und brache. *Zbl. Bakteriol*, 2, 14-25.
- Huang, X.-F., Chaparro, J. M., Reardon, K. F., Zhang, R., Shen, Q., & Vivanco, J. M. (2014). Rhizosphere interactions: Root exudates, microbes, and microbial communities. *Botany*, 92(4), 267-275. <https://doi.org/10.1139/cjb-2013-0225>
- Hungria, M., Araujo, R. S., Silva Júnior, E. B., & Zilli, J. É. (2017). Inoculum rate effects on the soybean symbiosis in new or old fields under tropical conditions. *Agronomy Journal*, 109(3), 1.106-1.112. <https://doi.org/10.2134/agnonj2016.11.0641>
- Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbere, O. J. (2018). Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A review. *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*, 6(3), 73-83. <https://directresearchpublisher.org/drjafs/files/2019/07/Itelima-et-al.pdf>
- Khosro, M., & Yousef, S. (2012). Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: A review. *APRN Journal of Agricultural and*

- Biological*, 7(5), 307-316. https://www.academia.edu/28274331/BACTERIAL_BIOFERTILIZERS_FOR_SUSTAINABLE_CROP_PRODUCTION_A_REVIEW
- Knobeloch, L., Salna, B., Hogan, A., Postle, J., & Anderson, H. (2000). Blue babies and nitrate-contaminated well water. *Environmental Health Perspectives*, 108(7), 675-678. <https://doi.org/10.1289/ehp.00108675>
- Liu, K., McInroy, J. A., Hu, C.-H., & Kloepper, J. W. (2017). Mixtures of plant-growth-promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple plant diseases and plant-growth promotion in the presence of pathogens. *Plant Disease*, 102(1), 67-72. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0478-RE>
- Lucy, M., Reed, E., & Glick, B. R. (2004). Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86(1), 1-25. <https://doi.org/10.1023/B:ANTO.0000024903.10757.6e>
- Mahimaraja, S., Dooraisamy, P., Lakshmanan, A., Rajannah, G., Udayasoorian, C., & Natarajan, S. (2008). Composting technology and organic waste utilization. *Journal of Science*, 1(3), 332-560.
- Malusá, E., & Vassilev, N. (2014). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(15), 6.599-6.607. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5828-y>
- Masuco Lopes, C., Miranda Silva, A. M., Estrada-Bonilla, G. A., Ferraz-Almeida, R., Vilela Vieira, J. L., Otto, R., Vitti, G. C., & Nogueira Cardoso, E. J. B. (2021). Improving the fertilizer value of sugarcane wastes through phosphate rock amendment and phosphate-solubilizing bacteria inoculation. *Journal of Cleaner Production*, 298, artículo 126821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126821>
- Mazid, M., & Khan, T. A. (2015). Future of bio-fertilizers in Indian agriculture: An overview. *International Journal of Agricultural & Food Research*, 3(3). <https://www.sciencetarget.com/Journal/index.php/IJAfr/article/view/132>
- Nihorimbere, V., Ongena, M., Smargiassi, M., & Thonart, P. (2011). Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 15(2), 327-337. https://www.researchgate.net/publication/297824614_Beneficial_effect_of_the_rhizosphere_microbial_community_for_plant_growth_and_health
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789-799. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Rasmann, S., & Turlings, T. C. J. (2016). Root signals that mediate mutualistic interactions in the rhizosphere. *Current Opinion in Plant Biology*, 32, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.06.017>
- Saad, M. M., Eida, A. A., & Hirt, H. (2020). Tailoring plant-associated microbial inoculants in agriculture: A roadmap for successful application. *Journal of Experimental Botany*, 71(13), 3.878-3.901. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa111>
- Sanches Santos, M., Nogueira, M. A., & Hungria, M. (2019). Microbial inoculants: Reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*, 9(1), artículo 205. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69, 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012>
- Taylor, M. D. (1997). Accumulation of cadmium derived from fertilisers in New Zealand soils. *Science of The Total Environment*, 208(1-2), 123-126. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00273-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00273-8)
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671-677. <https://doi.org/10.1038/nature01014>
- Uzoh, I. M., & Babalola, O. O. (2018). Rhizosphere biodiversity as a premise for application in bio-economy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 524-534. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.003>
- Vandenkoornhuyse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., & Dufresne, A. (2015). The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist*, 206(4), 1.196-1.206. <https://doi.org/10.1111/nph.13312>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255, 571-586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>
- Wall, L. G. (2015). Biofertilizers: Present and future use of transgenic micro-organisms. En OECD (ed.), *Biosafety and the environmental uses of micro-organisms: Conference proceedings* (pp. 23-34). <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264213562-5-enp.pdf?expires=1616168293&id=id&accname=guest&checksum=B4D7187F16379F4F4DBB6371A130C9F2>
- Zhang, B., Tian, H., Ren, W., Tao, B., Lu, C., Yang, J., Banger, K., & Pan, S. (2016). Methane emissions from global rice fields: Magnitude, spatiotemporal patterns, and environmental controls. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9), 1.246-1.263. <https://doi.org/10.1002/2016GB005381>