






Contribución de los biofertilizantes a la fertilidad, actividad biológica y resiliencia del suelo agrícola

Contribution of biofertilizers to the fertility, biological activity and resilience of agricultural soil

Diego Rodríguez-Muñoz¹, Yolanda del Rocío Moreno-Ramírez^{1*}, Mario Rocandio-Rodríguez¹, Gregorio Hernández-Salinas², Efraín Neri Ramírez¹.

¹Facultad de Ingeniería y Ciencias-Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87000. a2203010043@alumnos.uat.edu.mx (D. R.-M); mrocandio@docentes.uat.edu.mx (M.R.-R.); eneri@docentes.uat.edu.mx (E.N.-R.)

²Tecnológico Nacional de México, Campus Zongolica, Tepetitlanapa, Zongolica, Veracruz, México. C.P. 94310. gregorio_hs@zongolica.tecnm.mx (G. H.-S.). *Autor para correspondencia: yrmoreno@docentes.uat.edu.mx

RESUMEN: La conservación del suelo agrícola frente a la agricultura intensiva sostenida por el uso exhaustivo de fertilizantes sintéticos nitrogenados, el aumento poblacional y la aceleración del cambio climático, entre otros, surge como una forma de resiliencia que requiere estrategias de uso, así como de insumos de menor impacto sobre la microbiota del suelo, ya que de esta depende en gran medida su salud. Los biofertilizantes contribuyen a la fertilidad, actividad biológica y resiliencia del suelo agrícola, y se consideran una opción agroecológica para alcanzar la seguridad alimentaria mundial. La presente revisión se llevó a cabo mediante un enfoque bibliográfico de tipo narrativo, empleando bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, e incorporando artículos arbitrados en español e inglés publicados entre 2015 y 2026. La búsqueda empleó palabras clave sobre biofertilizantes y resiliencia del suelo aplicando operadores booleanos. Se priorizó la evidencia científica revisada por pares con el propósito de identificar y sintetizar el conocimiento

disponible sobre la contribución de los biofertilizantes a la resiliencia de los suelos agrícolas. La información obtenida destaca que, a diferencia de los fertilizantes sintéticos, los biofertilizantes permiten mantener y restaurar la calidad del suelo mediante sus funciones agronómicas y ecológicas, reduciendo simultáneamente los riesgos de contaminación del suelo y del agua asociados al uso intensivo de insumos químicos. La integración en la producción de cultivos en conjunto con dosis reducidas de fertilizantes minerales muestra alto potencial de contribuir de producir a la par la disponibilidad gradual de nutrientes y mejorar la biota del suelo. La integración de los biofertilizantes en sistemas de producción agroalimentaria se ha validado y propuesto como un modelo de manejo del suelo para aminorar los retos presentes y emergentes del sector agrícola.

PALABRAS CLAVE: Resiliencia del suelo, agrosistemas sostenibles, bioinsumos

ABSTRACT: The conservation of agricultural soil in the face of intensive agriculture sustained by the extensive use of synthetic nitrogen fertilizers, population growth, and accelerating climate change, among other factors, emerges as a form of resilience that requires strategies for its use, as well as inputs with less impact on the soil microbiota, since its health largely depends on it. Biofertilizers contribute to the fertility, biological activity, and resilience of agricultural soil and are considered an agroecological option for achieving global food security. This review was conducted using a narrative bibliographic approach, employing scientific databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar, and incorporating peer-reviewed articles in Spanish and English published between 2015 and 2026. The search used keywords on biofertilizers and soil resilience, applying Boolean operators. Peer-reviewed scientific evidence was prioritized to identify and synthesize the available knowledge on the contribution of biofertilizers to the resilience of agricultural soils. The information obtained highlights that, unlike synthetic fertilizers, biofertilizers maintain and restore soil quality through their agronomic and ecological functions, simultaneously reducing the risks of soil and water contamination associated with the intensive use of chemical inputs. Their integration into crop production, along with reduced doses of mineral fertilizers, shows high potential for contributing to the gradual availability of nutrients and improving soil biota. The integration of biofertilizers into agri-food production systems has been validated and proposed as a soil management model to mitigate current and emerging challenges in the agricultural sector.

KEYWORDS: Soil resilience, sustainable agroecosystems, bioinputs

INTRODUCCIÓN

La reducción en la provisión de bienes y servicios por efecto del cambio del estado de salud del suelo se denomina degradación (FAO, 2024), al perder la

calidad y productividad se reducen funciones clave y servicios ecosistémicos como: las capacidades del sistema suelo-planta orientadas a la producción de alimentos y manejo del agua, así como, el soporte para infraestructuras, la protección frente a fenómenos meteorológicos extremos, el sustento de la biodiversidad y el almacenamiento de carbono y nutrientes (Telo da Gama, 2023). La degradación del suelo se ha clasificado en cuatro categorías principales, según el proceso predominante que altera sus propiedades: i. procesos físicos y mecánicos, ii. procesos químicos y fisicoquímicos, iii. procesos biológicos y bioquímicos, y iv. procesos hidrológicos. Estas categorías suelen estar interrelacionadas, e incluso, ocurrir de manera simultánea (Molchanov *et al.*, 2015).

Los fertilizantes desempeñan un papel clave en la productividad de los sistemas agrícolas al proporcionar los nutrientes esenciales necesarios para un crecimiento y una productividad óptima de los cultivos, sin embargo, la ausencia de ejecución de buenas prácticas agrícolas como la realización del análisis del suelo previo y posterior al ciclo agrícola, así como la falta de sincronización entre la aplicación de nitrógeno y la demanda fisiológica del cultivo, han generado desequilibrios nutricionales y una ineficiente utilización de estos insumos. A ello se suman condiciones de aplicación inadecuadas, tales como niveles inapropiados de humedad, pendiente o textura del suelo, que favorecen procesos de lixiviación y escorrentía. En conjunto, estos factores contribuyen a un manejo deficiente de los fertilizantes sintéticos, lo cual repercute negativamente en la salud del suelo y conduce, en parte, a su degradación y a la disminución del rendimiento agrícola (Wang *et al.*, 2023a). Al respecto, José-Marqués (2021) señala que, aun cuando la agricultura no es la única causa de la degradación del suelo, sí representa uno de los factores más significativos, dado que en su evolución ha transformado negativamente de manera profunda el uso del suelo a nivel global por el uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos, la producción predominante a través de monocultivos, y la labranza excesiva. La degradación de los suelos agrícolas constituye una problemática que reduce la capacidad de los sistemas agro-productivos para satisfacer la demanda alimentaria lo cual pone en

riesgo a la población mundial (Karlen *et al.*, 2021). Esta problemática se ha acentuado, principalmente, por prácticas intensivas, la deforestación (en parte para expandir la frontera agrícola) y el cambio climático, que favorece procesos de erosión, salinización, pérdida de materia orgánica, compactación y contaminación del suelo. Estos factores de manera individual o conjunta reducen progresivamente su fertilidad y funcionalidad, consecuentemente vastas extensiones de superficie pierden su aptitud agrícola, afectando la seguridad alimentaria, así como los medios de subsistencia de millones de personas, especialmente en áreas rurales (Bayata *et al.*, 2024).

Se ha documentado que el 98.8 % de la energía alimentaria que consumen las personas proviene del suelo, lo que corresponde a 2,849 kcal *per cápita*, mientras que, solo el 1.2 % procede de fuentes acuáticas, es decir, 55 kcal *per cápita* (Ahmed *et al.*, 2025). Lo anterior, evidencia que la seguridad alimentaria humana depende casi totalmente del suelo. Dicha dependencia se ha mantenido a través del uso de fertilizantes minerales para aumentar la productividad agrícola y cubrir la demanda mundial de alimentos, impulsada por el incremento poblacional, así como modificaciones en las tendencias de consumo (Moretti *et al.*, 2025). La intensificación no ha reducido la brecha de incrementar el rendimiento por hectárea sin agravar la salud ambiental (Reyes-Palomino y Cano, 2022). A la producción agrícola basada en monocultivos de alto rendimiento establecidos en amplias extensiones agrícolas por periodos largos (Schmid y Schöb, 2023) se suman las rotaciones inadecuadas de cultivos, el pastoreo, la eliminación recurrente de residuos vegetales como el rastrojo, cuyo retorno beneficia las propiedades fisicoquímicas del suelo (Fu *et al.*, 2021), así como la sobreutilización de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Herrero *et al.*, 2025).

Si bien la intensificación agrícola ha aumentado significativamente la producción de cultivos aplicando fertilizantes sintéticos, Tufail *et al.* (2024) argumentan que la demanda de estos, en particular los nitrogenados han requerido de elevado costo

energético, climático y de salud pública. Adicionalmente, la proporción de nitrógeno absorbido por las plantas respecto al nitrógeno aplicado a los cultivos denominado como eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) es notablemente baja en la mayoría de los sistemas agrícolas (Herrero *et al.*, 2025). A mediados del siglo XX, la producción mundial de alimentos presentó un incremento significativo, impulsado principalmente por el uso intensivo de agroquímicos sintéticos, no obstante, su uso desproporcionado se considera uno de los factores que ha causado graves daños colaterales al medio ambiente provocando la pérdida de biodiversidad, la resistencia a los pesticidas y la aparición de nuevas plagas, así como la contaminación, y la disminución de la disponibilidad de agua dulce, la degradación y erosión del suelo, y efectos adversos en la salud (Parven *et al.*, 2025). La transformación agrícola y la Revolución verde, así como la generación de variedades vegetales y razas de ganado, requirieron de la aplicación de fertilizantes inorgánicos, pesticidas y maquinaria, mismos que condujeron a presiones considerables de los recursos. Lo anterior, permite señalar que la problemática del uso de fertilizantes sintéticos no es el insumo en sí, sino su manejo inadecuado. Paralelamente, el incremento progresivo de la demanda de productos agrícolas, impulsado por el crecimiento demográfico y las transformaciones en los hábitos alimentarios, hacen necesario atender las problemáticas relacionadas con la capacidad de la humanidad para sostener su alimentación utilizando los recursos limitados del planeta (Sud, 2020).

La intensificación agrícola convencional ha impulsado el desarrollo económico y el bienestar humano; no obstante, ha provocado un marcado deterioro de los sistemas del suelo (Kumari *et al.*, 2025). La interacción y acción individual de diversos factores adversos favorecen su degradación, comprometiendo la capacidad de los sistemas agrícolas para la producción de alimentos (Apoorva y Kundlas, 2024). Asimismo, la degradación del suelo pone en riesgo las condiciones de vida, debido a que afecta con mayor repercusión a quienes

dependen directamente de las actividades agrícolas (Ahmed *et al.*, 2025). Gran parte de la productividad, la biodiversidad y el equilibrio de los sistemas agrícolas depende de suelos sanos. Esta situación crítica ha impulsado estrategias con enfoque agroecológico que permitan transitar hacia la intensificación sostenibles a largo plazo, capaces de alimentar a una población mundial proyectada en 9,700 millones de personas para 2050 y 11,200 millones para 2100 (Vishwakarm y Ranjan, 2024). Muchos de estos enfoques, basados en principios de intensificación ecológica, contribuyen al enriquecimiento de la materia orgánica del suelo y al fortalecimiento de sus servicios ecosistémicos, lo que contribuye a mejorar la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas (Muchane *et al.*, 2020). Entendiendo que la capacidad para recuperar la estructura, funcionalidad y calidad, a partir de mecanismos de recuperación y reorganización funcional, tras la ocurrencia de perturbaciones de tipo natural o antropogénico se conoce como resiliencia del suelo (Sierka, 2025). Ante este multi escenario que evidencia el potencial riesgo en la producción y seguridad alimentaria surge la opción de transitar a prácticas agrícolas más sostenibles y con menor uso insumos químicos. Con base en lo anteriormente señalado, el objetivo del presente estudio fue desarrollar la revisión bibliográfica narrativa del papel de los biofertilizantes en la fertilidad, actividad biológica y resiliencia del suelo en agrosistemas.

METODOLOGÍA

La revisión bibliográfica narrativa inició con búsqueda de artículos en inglés y español consultando las bases de datos: Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar (este último como complemento), enfocándose en literatura científica arbitrada para identificar la evidencia disponible sobre la contribución de los biofertilizantes a la resiliencia de los suelos agrícolas. Se consideraron publicaciones de 2015 a 2026, con el fin de garantizar la actualidad y pertinencia de la información analizada. La

estrategia de búsqueda incluyó el uso de combinaciones de palabras clave en español e inglés, tales como “biofertilizantes”, “resiliencia del suelo”, “microorganismos benéficos”, “fertilidad del suelo”, “soil resilience” y “biofertilizers”. empleando operadores booleanos para optimizar la recuperación de documentos relevantes. Se descartaron estudios duplicados, literatura no arbitrada, documentos con información insuficiente o aquellos que no estaban directamente relacionados con la temática central. La información compilada se organizó temáticamente, lo que permitió identificar tendencias, coincidencias y vacíos de investigación en torno al papel de los biofertilizantes como herramientas para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La degradación del suelo agrícola y sus implicaciones en la salud del suelo

Los suelos de los sistemas agrícolas presentan una degradación generalizada en forma de erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación, compactación, aumento de la salinidad, siendo la estructura del suelo y la densidad aparente los factores con influencia directa en la asociación entre la degradación del suelo y la productividad agrícola (Belay *et al.*, 2026). La erosión, tanto hídrica como eólica, provoca el arrastre de la capa superficial también conocida como capa arable del suelo, que es la más rica en nutrientes y materia orgánica, reduciendo significativamente su fertilidad (Güven e Yildirim, 2026).

La materia orgánica es esencial para la retención de agua y oferta hídrica de los cultivos; su disminución altera las actividades y diversidad de los microorganismos, en consecuencia, se reduce la resiliencia de los agroecosistemas (Liang *et al.*, 2025). El control de fitopatógenos y la estimulación del crecimiento de la planta son beneficios derivados del establecimiento de microorganismos en suelos ricos en materia orgánica (Ortiz y Sansinenea, 2022). En el mismo sentido, la movilidad, absorción y el ciclo de nutrientes dependen de la actividad y composición de la microbiota, de manera que cualquier alteración puede derivar en repercusiones sobre la fertilidad y salud del suelo (Oro *et al.*,

2024). La pérdida de materia orgánica, en consecuencia, conlleva a incrementar el uso de fertilizantes químicos para mantener la productividad (Wang *et al.*, 2020). A pesar de que esta es una práctica común, Menšík *et al.* (2018) señalan que la aplicación recurrente de fertilizantes químicos en suelos con poca o sin materia orgánica deteriora aún más la calidad del recurso lo que puede conducir a la lixiviación de nitrógeno e incluso mayor disponibilidad de elementos tóxicos para las plantas. Ante ello, la incorporación del estiércol animal se ha propuesto como una alternativa para recuperar la materia orgánica. Aunque es importante reconocer que el uso de estiércoles provenientes de animales tratados con antiparasitarios de amplio espectro, como las ivermectinas, que tienen el potencial de afectar tanto a la microbiota del suelo como su actividad biológica. Al respecto, Lobo *et al.* (2026) señalan que el ganado tratado con este agente antiparasitario excreta en las heces al menos el 80 % del fármaco, lo cual puede alterar negativamente taxones funcionales clave de la cobertura vegetal y la fauna del suelo (por ej. escarabajos peloteros). En contraparte, Lupwayi *et al.* (2024) indican que los residuos de ivermectina en el estiércol tienen la capacidad de potencial la mineralización de nitrógeno del suelo, dado que productos de hidrólisis de ciertas enzimas microbianas como la N-acetil- β -glucosaminidasa puede estimular indirectamente la liberación de nitrógeno disponible.

Por otra parte, el uso integrado del estiércol animal junto a fertilizantes sintéticos de NPK a largo plazo ha evidenciado una alta eficiencia de secuestro de carbono (Sedlář *et al.*, 2023). No obstante, es pertinente señalar que este efecto depende fuertemente de la tasa de aplicación, del sistema de almacenamiento, así como de clima (Denoncourt *et al.*, 2025).

En relación con la sinergia entre la materia orgánica y los biofertilizantes, Jin *et al.* (2021) señalan que la incorporación de estos insumos en suelos arroceros puede generar efectos contrastantes sobre la inmovilización de cadmio. Dichos efectos están condicionados tanto por las propiedades edáficas como por la composición del biofertilizante, en particular por su contenido de materia orgánica. En este sentido, los autores concluyen que los

biofertilizantes con altos niveles de materia orgánica podrían no ser adecuados en suelos arroceros con elevada fracción arcillosa cuando el objetivo es reducir la acumulación de cadmio en los granos de arroz.

La degradación de la calidad del suelo involucra alteraciones en sus componentes físicos, químicos y biológicos, derivadas de prácticas inapropiadas, principalmente en contextos agrícolas, pecuarios y urbanos. Depende no solo de la interacción de diferentes factores físicos, químicos y biológicos del suelo, incluyendo las propiedades del suelo, la topografía y las características climáticas, sino también del uso de la tierra, los factores antropogénicos y de la gestión (Wang *et al.*, 2023b). La capacidad de los sistemas agro-productivos se ve atentada por la disminución de la calidad edáfica, colocando a estos en constante riesgo para satisfacer la progresiva demanda alimentaria mundial (Bedolla-Rivera *et al.*, 2023). La presión ejercida sobre los sistemas agrícolas por el aumento de la población, la modificación de los patrones de consumo y la necesidad de asegurar la disponibilidad y acceso a los alimentos ha conducido a una intensificación sin precedentes tanto en escala como en complejidad tecnológica (Ajibade *et al.*, 2023). De tal manera que, frente a la escasez de tierras arables y la urgencia de conservar los ecosistemas naturales, la estrategia predominante ha tenido por objetivo maximizar el rendimiento por unidad de superficie mediante la intensificación tecnológica, agroquímicos, riego tecnificado, mecanización y cultivos mejorados de alto rendimiento. Aproximadamente una cuarta parte de las tierras agrícolas a nivel mundial presentan algún grado de degradación debido al uso intensivo y se espera que esta cifra continúe en aumento en los próximos años (Zsögön *et al.*, 2022). Cerca de una tercera parte de la superficie terrestre ha sido degradada, con impacto a escala global en más de 2.6 mil millones de personas, este detrimento ha derivado del manejo intensivo del suelo con fines agrícolas, incidiendo, además, las prácticas agrícolas no sostenibles (Adão *et al.*, 2025).

Diversas proyecciones indican que, para satisfacer la demanda alimentaria proyectada hacia 2050, la producción mundial de cultivos deberá al menos duplicarse, como resultado tanto del aumento de la

población como de la transición hacia dietas más calóricas y ricas en proteínas. Al mismo tiempo, se mantiene el desafío de garantizar suministro alimentario de los 821 millones de personas afectadas por desnutrición crónica. Al respecto, Lal (2024) señala que la productividad junto con la calidad nutricional tanto de plantas como de animales son reducidas por la degradación y empobrecimiento del suelo; afectando la disponibilidad de nutrientes esenciales incluyendo micronutrientes (Fe, Zn, Se, Mo) así como cantidad de proteínas y la composición de aminoácidos, vitaminas y otros componentes fundamentales para la salud y el bienestar humano son deficientes en cereales y forrajes cultivados en suelos empobrecidos, lo que permite deducir que la degradación del suelo es una de las causas de desnutrición humana, especialmente entre comunidades rurales vulnerables (Akhmedov, 2025) donde se ha registrado retraso de crecimiento, bajo peso y anemia, además de dietas de poco valor nutricional y, alta vulnerabilidad socioeconómica.

La capacidad del suelo para seguir funcionando como un recurso finito y dinámico ha dado origen al concepto de salud del suelo. Dentro de los límites propios del ecosistema y de su uso, esta capacidad permite mantener la productividad biológica, así como conservar o mejorar la calidad del aire y del agua, y promover una sola salud (Lehmann *et al.*, 2020). Un suelo sano actúa como un sistema vivo dinámico que brinda múltiples servicios ecosistémicos, como el mantenimiento de la calidad del agua y la productividad vegetal, el control de la descomposición y del reciclaje de nutrientes del suelo y la eliminación de gases de efecto invernadero de la atmósfera.

La salud del suelo depende del vínculo entre biodiversidad microbiana y sostenibilidad agrícola; la diversidad biológica del suelo regula procesos ecológicos fundamentales que garantizan la productividad y funcionalidad del agroecosistema (Tahat *et al.*, 2020). Esta última se define como la capacidad de un sistema de producción agrícola para producir alimentos de manera continua sin comprometer negativamente al medio ambiente. De manera que la salud del suelo es un término que describe el estado general o la calidad del recurso suelo. En particular, los suelos cultivados conocidos

también como suelos agrícolas presentan una degradación generalizada (erosión acelerada, disminución de la fertilidad y pérdida de nutrientes, contaminación por prácticas convencionales y deterioro estructural, principalmente) pese a que la gestión del suelo es crucial para los sistemas agrícolas (Liao *et al.*, 2025). De acuerdo con Kibblewhite (2018) el suelo es un sistema multicomponente y multifuncional, con variantes acordes a cada tipo de suelo que se originan en función de la diferenciación de factores, como el material parental, el clima y la topografía, que influyen en gran medida las propiedades físicas y químicas del sistema. Todos los factores anteriores, pueden ser alterados por las intervenciones agrícolas. Bajo este mismo enfoque, se señala que el suelo agrícola constituye un sistema multidimensional caracterizado por la interacción de múltiples funciones y procesos biogeoquímicos que operan en diversas escalas espaciales y temporales (Adams *et al.*, 2025). Por lo tanto, su manejo requiere un enfoque integral que trascienda la reducción en el uso de fertilizantes inorgánicos convencionales, sino de una reorientación hacia la generación, validación y adopción de alternativas sostenibles. Dichas alternativas deben ser de bajo costo, con menor impacto ecológico, capaces de garantizar la calidad de la producción, contribuir a la restauración de los ecosistemas y minimizar los posibles riesgos para la salud humana, como se ha documentado en el uso de los biofertilizantes.

Biofertilizantes en la gestión sostenible de la fertilidad y conservación de los suelos agrícolas

Un biofertilizante, básicamente, es una bioformulación que contiene organismos vivos. Los fertilizantes biológicos se consideran insumos biológicos formulados con preparaciones que contienen células vivas de cepas altamente eficientes de microorganismos fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fosfatos y silicatos, así como degradadores de celulosa (Hasan *et al.*, 2025). Los procesos naturales que transforman los nutrientes en formas más accesibles para las plantas se favorecen por el incremento de la población microbiana, la cual aumenta de forma sinérgica al incorporarse el biofertilizante al suelo (Okur, 2018; Maçik *et al.*, 2020). Cabe recordar, que los nutrientes como NPK

no se encuentran siempre disponibles para ser absorbidos por las plantas, por lo que biofertilizante al agregar microorganismos al suelo y aumenta la población microbiana potencia la aceleración de los procesos de transformación de estos nutrientes a formas asimilables.

El desarrollo de las plantas es favorecido por inóculos microbianos mediante mecanismos directos o a través de procesos biogeoquímicos como la fijación biológica de N, P, K junto a la producción de sideróforos, antibióticos, enzimas y compuestos con propiedades antifúngicas y antibacterianas; la estimulación del crecimiento vegetal depende de las hormonas liberadas, lo que en consecuencia aumenta la productividad y mejora la capacidad de adaptación bajo condiciones de estrés tanto biótico como abiótico (Itelima *et al.*, 2018).

Las interacciones entre plantas, microorganismos y la rizosfera forman una red compleja, dinámica y altamente interdependiente tanto en ecosistemas naturales como en agroecosistemas (Tariq *et al.*, 2025). La rizosfera actúa como un modulador de la respuesta del suelo frente a disturbios físicos, químicos y climáticos, favoreciendo la recuperación de funciones ecosistémicas esenciales, al mismo tiempo, su actividad biológica forma un microambiente altamente dinámico donde las interacciones entre planta y microorganismo regulan procesos claves como la descomposición mineral de nutrientes, la estabilización de la materia orgánica y la supresión de patógenos (Asghar *et al.*, 2024).

La mayor densidad, diversidad y actividad metabólica microbiana se encuentran en la rizosfera, a mayor distancia de la superficie, la cantidad de microorganismos disminuye, llegando incluso a ser nula entre 1 y 2 m (Figiel *et al.*, 2025). De tal manera que, la rizosfera, además, es el nicho donde la liberación de sustancias orgánicas y señales químicas que estimulan la multiplicación microbiana y seleccionan comunidades funcionales definidas (Li *et al.*, 2025). La relación entre la rizosfera y la microbiota del suelo es altamente dependiente y funcional, regula la fertilidad, estabilidad y resiliencia del suelo. Esta relación genera la redundancia funcional conservando procesos clave de los microorganismos después de un disturbio que haya afectado parte de la comunidad microbiana

manteniendo otras especies con funciones similares de los procesos esenciales (Chen *et al.*, 2022). La redundancia funcional junto con la transferencia horizontal de genes, la cooperación microbiana y la simbiosis planta-microbio son procesos adaptativos que permiten que los suelos mantengan o recuperen su funcionalidad incluso bajo estrés (Sierka *et al.*, 2025).

Al proceso de mejorar la eficacia del suelo para optimizar el crecimiento y rendimiento vegetal se conoce como el manejo de la rizosfera y, se logra a través de los mecanismos multidimensionales de los microorganismos. Gran parte de las funciones del suelo tienen un origen microbiano (Nazaries *et al.*, 2021). Al formar asociaciones mutualistas luego de colonizar las rizosferas de las plantas, los biofertilizantes tienen la capacidad de aumentar la eficiencia del uso de nutrientes, promover el crecimiento de las raíces, mejorar la estructura del suelo además de estimular la actividad de la deshidrogenasa y fosfatasa, principalmente, así como de poblaciones microbianas diversas (Sharma *et al.*, 2023).

En suelos degradados donde se ha disminuido o eliminado gran parte de su microbiota, los biofertilizantes o bien, formulaciones microbianas vivas pueden renovar y reforzar funciones que ya existían en la rizosfera, aunque su eficacia para la recuperación de procesos como fijación de nitrógeno, solubilización de P y producción de hormonas vegetales depende de dos factores determinantes: i. la capacidad de establecimiento en la rizosfera y ii. su interacción con la microbiota nativa del suelo también denominada diversidad residual (Figura 1) (Fasusi *et al.*, 2021).

La interacción simbiótica entre plantas y microorganismos constituye una unidad ecológica integrada (holobionte), cuya composición microbiana está determinada principalmente por las características de los exudados radiculares y la dinámica de absorción de nutrientes de la planta, lo anterior, es un punto esencial y el reto de la adopción de los biofertilizantes, principalmente en relación a la competencia microbiana y las posibles interacciones con la microbiota nativa además de la

fuerte influencia ambiental que tienen estos dos factores (Chakraborty y Akhtar, 2021).

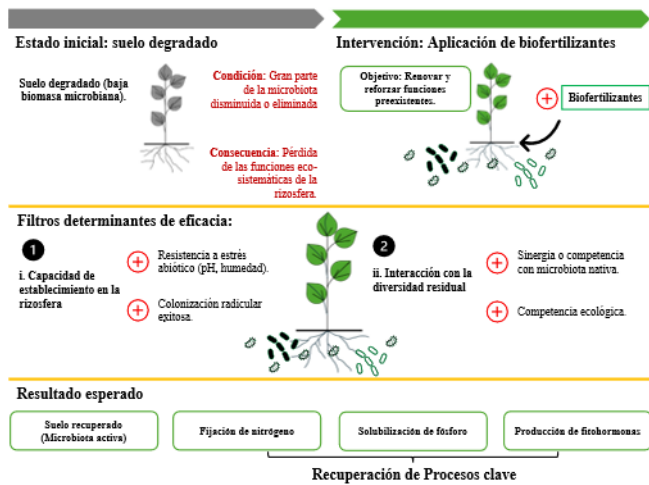


Figura 1. Restauración de funciones microbianas en suelos degradados con biofertilizantes (Adaptado de Fasusi *et al.*, 2021).

Por su parte, Zhan (2025) señala que la temperatura, pH y los niveles de humedad del suelo son altamente incidentes en la eficiencia del biofertilizante, sobre todo por su efecto en la supervivencia y actividad de los microorganismos. Si bien es cierto que los biofertilizantes pueden mejorar la proporción entre la cantidad de nutrientes aplicados y los usados por la planta mediante mecanismos como: la liberación gradual de nutrientes, una mejor arquitectura radicular para una mayor intercepción de nutrientes, una mejor estructura del suelo para una mayor retención de nutrientes y la conversión de formas no disponibles en formas aprovechables para las plantas, es importante también, considerar los factores con mayor incidencia sobre su eficacia como lo son: el pH, contenido de materia orgánica y textura del suelo, las condiciones ambientales (temperatura y humedad), además de la composición y actividad de la comunidad microbiana e incluso la especie vegetal y la etapa de crecimiento, así como el método y momento de aplicación (Figiel *et al.*, 2025).

A su vez el diseño de estrategias con enfoques integrales para la gestión nutrimental ha incluido a los biofertilizantes para validar su efectividad junto a fertilizantes minerales y orgánicos a fin de reducir e incluso llegar a la sustitución parcial de químicos sintéticos. Bajo un enfoque de sostenibilidad, la integración de microorganismos beneficiosos con

fertilización combinada (orgánica e inorgánica) tienen la capacidad de potencializar de manera significativa la productividad agrícola, al tiempo que fortalece la resiliencia del suelo y contribuye a la seguridad alimentaria (Imran, 2024). Lo anterior, ha sido demostrado a través de varios estudios como el realizado por Al-Suhaibani *et al.* (2020) donde la aplicación combinada de NPK junto a *Azotobacter* y micorrizas mejoró la dinámica del nitrógeno en el suelo, la disponibilidad de P y K, la actividad microbiana, el crecimiento radicular, la actividad de la ureasa y la eficiencia del uso del nitrógeno, en comparación con el tratamiento solo con NPK. De manera que el manejo integrado de nutrientes, incorporando biofertilizantes puede sustituir total o parcialmente los fertilizantes químicos. En el mismo sentido, Abou *et al.* (2021), han evidenciado que la integración de humato de potasio y biofertilizantes mejora la eficiencia fisiológica de los cultivos como el maíz (*Zea mays*) bajo condiciones de disponibilidad limitada de agua, por una parte, el humato de potasio contiene grupos carboxilo, hidroxilo fenólico y otros grupos funcionales, posee una fuerte capacidad de adsorción superficial y de complejación, lo que reduce la pérdida de N amoniacal y potencia la síntesis de azúcares, almidón y proteínas, y por otro lado, los biofertilizantes producen sustancias promotoras del crecimiento, como el ácido indolacético y el ácido giberélico, mejoran la absorción, translocación y síntesis de asimilados fotosintéticos, lo que resulta en una sinergia altamente viable.

En relación a la sinergia de los biofertilizantes con las prácticas agrícolas, se ha demostrado que la aplicación de estos en conjunto con la rotación de cultivos o policultivos con cereales y labranza cero en la producción de alimentos con relevancia dietética y cultural como el caso de las legumbres en la India, aumenta la productividad, la sostenibilidad y la salud del suelo (Gupta *et al.*, 2024) lo que permite a la población disponer de un alimento diverso en nutrientes y una de las fuentes más ricas de fibra dietética, y proteína vegetal, aumento a su disponibilidad a un precio asequible (Lisciani *et al.* 2024) a la par de contribuir a la seguridad alimentaria se suma que las legumbres son preferidas en áreas rurales sobre el cultivo de arroz y

trigo, por su desempeño agronómico aun condiciones de menor disponibilidad hídrica. En el mismo sentido, al evaluar los impactos de la labranza a largo plazo, los residuos de cultivos y los biofertilizantes en el secuestro de Carbono. Roy *et al.* (2025) cuantificaron un secuestro de C significativamente mayor en comparación con los biofertilizantes aplicados sin residuos de cultivo, lo cual muestra el potencial de contribuir a mitigar el cambio climático y su relación con la restauración de la calidad del suelo, por lo que se demuestra que los biofertilizantes son más efectivos cuando se integran dentro de un manejo agrícola conservacionista.

Las prácticas de labranza, la retención de residuos y la bio-inoculación influyen de forma directa en las emisiones de CO₂. La combinación de labranza con residuos y biofertilizantes genera las mayores emisiones al acelerar la transformación de la materia orgánica. En cambio, la siembra directa favorece la actividad biológica, la estabilidad estructural de los agregados y su capacidad de retención de humedad, lo que incrementa el carbono orgánico del suelo. Cuando la labranza se introduce tras la aplicación de residuos y biofertilizantes, se intensifica la conversión de compuestos orgánicos y aumentan las emisiones de CO₂ debido a la actividad de los microorganismos y a la de la fauna del suelo, lo cual permite acumular y conservar carbono orgánico, mejorar su funcionamiento biológico y aumentar su estabilidad a largo plazo (Bhattacharya, 2025). Las prácticas sostenibles, como el uso de biofertilizantes, favorecen una mayor diversidad y funcionalidad microbiana, lo que se traduce en un ciclo de nutrientes más eficiente, mejores interacciones planta-microorganismo y una mayor supresión natural de patógenos. La abundancia de grupos microbianos benéficos como *Rhizobium*, *Actinobacteria* y *Trichoderma* en sistemas orgánicos, se reconoce su importancia clave en la fertilidad del suelo. Por el contrario, los suelos convencionales, caracterizados por una menor diversidad microbiana y un aumento de genes de resistencia a los antibióticos, indican un desequilibrio ecológico derivado del uso excesivo de productos químicos. Lo anterior, destaca la importancia de promover prácticas agrícolas

sostenibles que fortalezcan el microbioma del suelo como base para la conservación de la fertilidad a largo plazo, la estabilidad ecológica y la capacidad de los sistemas de producción agrícola viables a largo plazo (Harsha, 2025).

Biofertilizantes: Beneficios a la salud humana, uso en cultivo sin suelo y el enfoque integral del aprovechamiento de residuos para su obtención

La aplicación de los biofertilizantes ha conducido a la disminución significativa de la acumulación de nitratos en los tejidos vegetales, principalmente en hortalizas, lo cual es relevante dado que el consumo excesivo de nitratos se asocia con riesgos para la salud, como la formación de nitrosaminas potencialmente carcinogénicas (Figura 2), (Dasgan *et al.*, 2022).

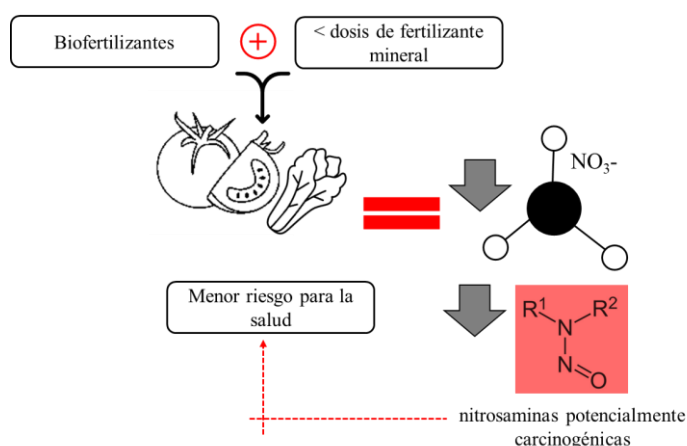


Figura 2. Biofertilizantes como estrategia para reducir nitratos y el riesgo de nitrosaminas en la producción de hortalizas (Adaptado de Fasusi *et al.*, 2021).

En tomate (*Solanum lycopersicum*) la incorporación de un biofertilizante enriquecido con *Trichoderma* junto a una reducción del 25 % del fertilizante mineral mostró una disminución de hasta el 62 % de NO₃⁻, así como el aumento del 57 % en la vitamina C y el 24 % de incremento en sólidos solubles en comparación con la aplicación del 100 % del fertilizante mineral (Ye *et al.*, 2020). El estudio del efecto de los biofertilizantes sobre el rendimiento foliar, la cantidad de NO₃⁻, el contenido mineral y los antioxidantes de la albahaca aplicando solo el 50 % del fertilizante mineral en un cultivo flotante mostró mejor absorción de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu, aumento de fenoles y flavonoides en hojas,

por lo que la reducción del fertilizante mineral a la par de la utilización del biofertilizante incrementó el valor nutracéutico de estas hortalizas. Otros estudios muestran un rendimiento comparable al uso completo de fertilizantes minerales, pero con mayor contenido nutricional en los cultivos bio-fertilizados. Por tanto, el uso de biofertilizantes no solo incrementa la productividad agrícola, sino que también contribuye a la mejora de la calidad nutricional y la seguridad sanitaria de los alimentos, contribuyendo a dietas más saludables y a sistemas agroalimentarios sostenibles.

En los sistemas de cultivo sin suelo, como la hidroponía, la ausencia de suelo implica también la falta natural de microorganismos benéficos en la rizosfera, lo que limita las interacciones biológicas que favorecen el crecimiento vegetal. En este contexto, los biofertilizantes desempeñan un papel clave, ya que permiten introducir de forma controlada microorganismos a estos sistemas. Mejía-Guerra *et al.* (2025), señalaron la mejora en la composición, la actividad bioquímica y la diversidad funcional de los consorcios microbianos de la rizosfera en el cultivo orgánico de *Cucumis melo* L. var. *reticulatus* establecido en un sistema de cultivo sin suelo al combinar té de vermicompost y el biofertilizante con microorganismos promotores del crecimiento vegetal en conjunto con la cobertura rotacional con *Mucuna pruriens*. Se enfatiza, además, que los biofertilizantes estimulan la actividad metabólica y eficiencia funcional de microorganismos fijadores de N y solubilizadores de P, mejorando el suministro de nutrientes para las plantas.

Dasgan *et al.* (2023) evidenciaron la mejora del rendimiento, calidad y el contenido de antioxidantes de la lechuga mediante el uso de biofertilización con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas a la raíz en hidroponía. Por su parte, Sato *et al.* (2023) desarrollaron un biofertilizante microbiano rico en nitrato que al aplicar en hidroponía para la producción de *S. lycopersicum* estimuló la formación de biopelículas en las raíces y aumentó la biomasa en comparación con fertilizantes inorgánicos, además se identificaron OTUs (Unidades Taxonómicas Operativas) de

Rudaea, *Chitinophaga* y *Stenotrophobacter*, de manera que estos grupos estuvieron presentes y activos en el sistema radicular lo cual sugiere un microbioma con potencial supresor de patógenos, contribuyendo a la sanidad radicular y a la estabilidad del sistema productivo. Pappalettere *et al.* (2024) utilizaron bacterias endofíticas productoras de auxina (*Azospirillum*, *Bacillus*) en plántulas de tomate en hidroponía con los que se produjo mayor tasa de supervivencia y significativo aumento del crecimiento radicular, y del tallo, asociado con mayor producción de ácido indolacético lo cual se relaciona con crecimiento observado. Setiawati *et al.* (2023) demostraron que la aplicación conjunta de 50 % de fertilizante inorgánico y 100 % de biofertilizante en sistemas hidropónicos incrementó las comunidades bacterianas involucradas en la fijación de nitrógeno y solubilización de fósforo. Asimismo, esta combinación promovió un aumento en el peso de fruto de aproximadamente 36 % en comparación con el tratamiento de 100 % de fertilizante inorgánico sin biofertilizante. La incorporación de biofertilizantes a sistemas de producción sin suelo mejora la nutrición de las plantas al aumentar la eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes, promueve su crecimiento y reduce la dependencia de fertilizantes minerales.

Finalmente, es importante señalar que los biofertilizantes logran el reciclaje de nutrientes, básicamente, al ser producidos a partir de subproductos industriales de tipo alimenticio y agroalimenticio, así como de residuos orgánicos (Hidalgo *et al.*, 2025). Por ejemplo, Ridderch *et al.* (2025) desarrollaron biofertilizantes fermentados con *Enterobacter*, *Bacillus* y *Pseudomonas* usando residuos agroindustriales (cáscara de cacahuate, paja de arroz, salvado de arroz), al evaluarse el cultivo bajo estrés salino, los resultados indicaron que los biofertilizante mejoraron la germinación y el crecimiento radicular notablemente (hasta 188 % en biomasa total), además de incrementar la disponibilidad de P hasta 143 % más y diversificaron el microbioma del suelo, mientras que condiciones no salinas, superaron el rendimiento de fertilizantes

minerales convencionales. Asimismo, Vargas *et al.* (2024) al utilizar como biofertilizante levaduras residuales de *Saccharomyces cerevisiae* que forman parte de la contaminación generada por la industria cervecera, evidencian la mejora en la germinación, crecimiento, biomasa y estado fisiológico de plántulas de lechuga y tomate, con una eficiencia comparable a fertilizantes comerciales cuando se aplican en dosis óptimas (10^7 células mL⁻¹). Lo anterior, refleja el enfoque integral para la valorización de los residuos de la industria alimentaria y su potencial sustituto parcial o total de insumos convencionales aplicados a la agricultura a través de los biofertilizantes.

CONCLUSIONES

La evidencia disponible sugiere que los biofertilizantes son una alternativa altamente viable para disminuir el uso de fertilizantes convencionales. La incorporación de los biofertilizantes al manejo integral de nutrientes presenta un alto potencial de aplicación para evitar el sobreuso de los fertilizantes minerales, no obstante, requiere de una evaluación exhaustiva en relación con la demanda nutrimental del cultivo, la sincronización de aplicación y sus etapas fenológicas, así como condiciones del terreno y características del suelo. Además de considerar su bio-formulación, compatibilidad y calidad del propio biofertilizante a fin de transitar estructurada a sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes. Se reconoce que la aplicación de los biofertilizantes contribuye de manera directa a la mejora de la fertilidad edáfica relacionada con una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales, estimular la actividad biológica y fortalecer las interacciones benéficas en la rizosfera, sin embargo, es importante considerar que las propiedades del suelo tienen un efecto importante en esta respuesta, lo anterior abre la oportunidad de enfocarse en investigaciones de la rizosfera de suelos agrícolas. De los principales beneficios obtenidos de los fertilizantes destaca su capacidad de mantener y restaurar la calidad del suelo al incrementar su microbiota, aunque factores biológicos como la competencia microbiana e interacciones posibles con la microbiota nativa son elementos que considerar con relación a su

rendimiento en campo y en su integración parcial en programas de fertilización.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Tamaulipeco de Ciencia y Tecnología por la aprobación del proyecto: “Sistema de producción de fertilizantes orgánicos líquidos para la recuperación de suelos degradados en el estado de Tamaulipas” (COTACYT/DFI/006/2025) financiado a través de la Convocatoria: Impulso a la Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Tamaulipas 2024.

DECLARAR SIN CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores del presente artículo de revisión declaramos no tener conflicto de intereses.

ORCID DE LOS AUTORES

<https://orcid.org/0009-0003-3900-747X>

<https://orcid.org/0000-0002-1580-1471>

<https://orcid.org/0000-0002-8296-0843>

<https://orcid.org/0000-0001-7857-3624>

<https://orcid.org/0000-0003-1547-9942>

REFERENCIAS

- Abou, B.D.M., Hellal, F. and Sayed, E.S. (2021). The combined effect of potassium humate and bio-fertilizers on maize productivity and quality under water stress conditions. *Science Archives*, 2(3), 162-170. <http://dx.doi.org/10.47587/SA.2021.2302>
- Adams, Z., Modi, A.T. and Kuria, S.K. (2025). Multidimensional Perspective of Sustainable Agroecosystems and the Impact on Crop Production: A Review. *Agriculture*, 15(6), 581. <https://doi.org/10.3390/agriculture15060581>
- Adão, F., Pádua, L. and Sousa, J.J. (2025). Evaluating Soil Degradation in Agricultural Soil with Ground-Penetrating Radar: A Systematic Review of Applications and Challenges. *Agriculture*, 15(8), 852. <https://doi.org/10.3390/agriculture15080852>

- Ahmed, F., Shakeel, A., Ahmad, S. and Kaur, N. (2025). Exploring the Linkages Between Land Degradation and Food Insecurity. *Asia-Pacific Journal of Rural Development*, 10185291241307272. <https://doi.org/10.1177/10185291241307272>
- Ajibade, S., Simon, B., Gulyas, M. and Balint, C. (2023). Sustainable intensification of agriculture as a tool to promote food security: A bibliometric analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1101528. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1101528>
- Akhmedov, K., Osbayov, M., Sultanov, R., Kasimova, K., Asrorova, Z. and Ergasheva, S. (2025). Exploring the Relationship Between Land Degradation and Malnutrition-Related Diseases in Vulnerable Populations. *Journal of Animal Environment*, 17(3), 865-876. <https://doi.org/10.70102/AEJ.2025.17.3.70>
- Al-Suhaibani, N., Selim, M., Alderfasi, A. and El-Hendawy, S. (2020). Comparative performance of integrated nutrient management between composted agricultural wastes, chemical fertilizers, and biofertilizers in improving soil quantitative and qualitative properties and crop yields under arid conditions. *Agronomy*, 10(10), 1503. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101503>
- Apoorva, M.S. and Kundlas, K. (2024). Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: A review. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(12), 285-289. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i12d.2146>
- Asghar, W., Craven, K. D., Swenson, J. R., Kataoka, R., Mahmood, A. and Farias, J. G. (2024). Enhancing the resilience of agroecosystems through improved rhizosphere processes: a strategic review. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(1), 109. <https://doi.org/10.3390/ijms26010109>
- Bayata, A. (2024). Soil Degradation: Contributing Factors and Extensive Impacts on Agricultural Practices and Ecological Systems-Systematic Review. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 13, 16-34. <https://doi.org/10.15640/ijhs.v13a2>
- Bedolla-Rivera, H.I., Negrete-Rodríguez, M.D.L.L.X., Gámez-Vázquez, F.P., Álvarez-Bernal, D. and Conde-Barajas, E. (2023). Analyzing the impact of intensive agriculture on soil quality: A systematic review and global meta-analysis of quality indexes. *Agronomy*, 13(8), 2166. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082166>
- Belay, M., Hu, C., Sadras, V., Wang, Z., Wang, W., Zhang, Y., Li, L., Dou, Ch., Xue, Y., Yang, X. He, J. and Zhang, S. (2026). Response of maize yield to soil management practices: a global meta-analysis. *Plant and Soil*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11104-026-08280-6>
- Bhattacharya, U., Naskar, M.K., Kumari, V.V., Sarkar, S., Bandyopadhyay, P., Maitra, S. Al-Shuraym, A.L., Alkeridis A.L., Gaber, A. and Hossain, A. (2025). Synergistic influence of minimum tillage and integrated nutrient schedules on crop performance, nutrient uptake, profitability and soil microbial diversity in a rice-lentil cropping system. *BMC Plant Biology*, 25(1), 1324. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07231-0>
- Chaudhary, P., Singh, S., Chaudhary, A., Sharma, A. and Kumar, G. (2022). Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13, 930340. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.930340>
- Chen, H., Ma, K., Lu, C., Fu, Q., Qiu, Y., Zhao, J., Huang, Y., Yang, Y., Schad, C. W. and Chen, H. (2022). Functional redundancy in soil microbial community based on metagenomics across the globe. *Frontiers in microbiology*, 13, 878978. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.878978>
- Chen, X. (2025). The role of modern agricultural technologies in improving agricultural productivity and land use efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1675657. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1675657>
- Chakraborty, T. and Akhtar, N. (2021). Biofertilizers: prospects and challenges for future. *Biofertilizers: study and impact*, 575-590. <https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch20>

- Dasgan, H.Y., Aldiyab, A., Elgudayem, F., Ikiz, B. and Gruda, N.S. (2022). Effect of biofertilizers on leaf yield, nitrate amount, mineral content and antioxidants of basil (*Ocimum basilicum* L.) in a floating culture. *Scientific Reports*, 12(1), 20917. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24799-x>
- Dasgan, H.Y., Yilmaz, D., Zikaria, K., Ikiz, B. and Gruda, N.S. (2023). Enhancing the yield, quality and antioxidant content of lettuce through innovative and eco-friendly biofertilizer practices in hydroponics. *Horticulturae*, 9(12), 1274. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9121274>
- Denoncourt, C., Chantigny, M. H., Angers, D. A., Maillard, É. and Halde, C. (2025). Animal manure application promotes nitrogen and organic carbon accumulation in soil organic matter fractions: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 996, 180097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180097>
- FAO (2024). *FAO soils portal*. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>(Consultado el 04 de febrero, 2026).
- Fasusi, O.A., Cruz, C. and Babalola, O.O. (2021). Agricultural sustainability: microbial biofertilizers in rhizosphere management. *Agriculture*, 11(2), 163. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020163>
- Figiel, S., Rusek, P., Ryszko, U. and Brodowska, M. S. (2025). Microbially enhanced biofertilizers: technologies, mechanisms of action, and agricultural applications. *Agronomy*, 15(5), 1191. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051191>
- Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P. and Wei, Z. (2021). Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1), 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>
- Gupta, A., Saharan, B.S., Sadh, P.K. and Duhan, J. S. (2024). Green to green: harnessing biofertilizers for sustainable pulse production and food security. *Discover Plants*, 1(1), 73. <https://doi.org/10.1007/s44372-024-00079-y>
- Güven, O. and Yıldırım, Ü. (2026). Soil Erosion Susceptibility Assessment of the Seyhan River Basin Using Stream Power Index (SPI) and Topographic Wetness Index (TWI). *Turkish Journal of Applied Geoinformation Sciences*, 8(1), 28-38. <https://izlik.org/JA52FY96MJ>
- Harsha, T.S. (2025). Metagenomic Analysis of Soil Microbiome Diversity under Organic and Conventional Farming Systems. *International Journal of Modern Microbiology*, 1(1), 40-48. <https://ijmmb.com/journal/index.php/ijmm/article/view/6>
- Hasan, H.H., Alalaf, A.H.E., Alrawi, S.K., Mejbel, E.A. and Abd Al Kareem, F.Z. (2025, October). Biofertilizers: Types, Importance, and Application Methods Compared to Nano. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.1538 (1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1538/1/012077>
- Herrero, J., Ramírez-Santos, A., Díaz-Santos, E. and Torres-Cortés, G. (2025). Biofertilizers for Enhanced Nitrogen Use Efficiency: Mechanisms, Innovations, and Challenges. *Nitrogen*, 6(4), 111. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6040111>
- Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J.M., Corona, F. and Verdugo, F. (2025). Waste-Derived Fertilizers: Conversion Technologies, Circular Bioeconomy Perspectives and Agronomic Value. *Agronomy*, 15(9), 2167. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092167>
- Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A. and Oj, E. (2018). A review: biofertilizer; a key player in enhancing soil fertility and crop productivity. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2(1), 22-28. <https://www.mbbcollege.in/db/notes/414.pdf>
- Imran. (2024). Integration of organic, inorganic and bio fertilizer, improve maize-wheat system productivity and soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 47(15), 2494-2510. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2354190>
- José-Marqués, M. (2021). El suelo agrícola, una perspectiva histórica de su degradación y la oportunidad de contribuir a la mitigación del cambio climático. *Revista española de*

- desarrollo y cooperación*, (48), 35-56. <https://doi.org/10.5209/redc.81175>
- Jin, Y., Zhang, B., Chen, J., Mao, W., Lou, L., Shen, C. and Lin, Q. (2021). Biofertilizer-induced response to cadmium accumulation in *Oryza sativa* L. grains involving exogenous organic matter and soil bacterial community structure. *Ecotoxicology and environmental safety*, 211, 111952. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111952>
- Karlen, D. L., De, M., McDaniel, M. D. and Stott, D. E. (2021). Evolution of the soil health movement. *Soil health series: volume 1 approaches to soil health analysis*, 21-48. <https://doi.org/10.1002/9780891189817.ch2>
- Kibblewhite, M.G. (2018). Contamination of agricultural soil by urban and peri-urban highways: An overlooked priority?. *Environmental Pollution*, 242, 1331-1336. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.008>
- Kumari, M., Swati and Priyanka, K. (2025). A Comprehensive Review on Sustainable Agricultural Intensification and Ecosystem Services. In: Gupta, J., Verma, A. (eds) *Green Equilibrium. Green Energy and Technology*. Springer, Singapore. 163-178. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3993-9_8
- Lal, R. (2024). Soil Degradation Effects on Human Malnutrition and Under-Nutrition. *Medical Research Archives*, 12(10). <https://doi.org/10.18103/mra.v12i10.5753>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I. and Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Li, X., Xiao, R. and Tao, Y. (2025). Enhancing plant stress resilience and agricultural sustainability through rhizosphere microbiome optimization. *Plant and Soil*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07359-w>
- Liang, X., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y. and Yin, D. (2025). Integrated management practices foster soil health, productivity, and agroecosystem resilience. *Agronomy*, 15(8), 1816. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081816>
- Liao, Y., Yu, Z., Kuang, L., Jiang, Y., Yu, C., Li, W., Liu, M., Guo, X. and Ye, Y. (2025). Analysis of cultivated land degradation in southern China: diagnostics, drivers, and restoration solutions. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1533855. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1533855>
- Lisciani, S., Marconi, S., Le Donne, C., Camilli, E., Aguzzi, A., Gabrielli, P., Gambelli, L., Kunert, K., Marais, D., Vorster, B. J., Alvarado-Ramos, K., Reboul, E., Cominelli, L., Preite, Ch., Sparvoli, F., Losa, A., Sala, T., Botha, A-M. and Ferrari, M. (2024). Legumes and common beans in sustainable diets: nutritional quality, environmental benefits, spread and use in food preparations. *Frontiers in nutrition*, 11, 1385232. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1385232>
- Lobo, J. M., Triadó-Margarit, X., Casamayor, E. O., Cortez, V., Sánchez-Piñero, F. and Verdú, J. R. (2026). Short-term microbial dynamics and changes in greenhouse gas emissions in cattle dung treated with ivermectin. *Applied Soil Ecology*, 218, 106704. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106704>
- Lupwayi, N. Z., Floate, K. D. and Petri, R. M. (2024). The veterinary parasiticide ivermectin increased the activity of an enzyme that mediates soil chitin degradation on a prairie grassland. *Applied Soil Ecology*, 197, 105338. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105338>
- Maçik, M., Gryta, A. and Fraç, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in agronomy*, 162, 31-87. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Mejía-Guerra, P.A., Estrella-González, M.J., Salas-Sanjuán, M.C., Jurado, M.M., Toribio, A.J., Martínez-Gallardo, M.R., López-González, J.A., Suarez-Estrella, F. and López, M. J. (2025). Microbial community in a soilless cultivation system with organic fertilization, biofertilizers and cover crop rotation. *Science of The Total Environment*, 998, 180248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180248>

- Menšík, L., Hlisnikovský, L., Pospíšilová, L. and Kunzová, E. (2018). The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment. *Journal of soils and sediments*, 18(8), 2813-2822. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-1933-3>
- Molchanov, E.N., Savin, I.Y., Yakovlev, A.S., Bulgakov, D.S. and Makarov, O.A. (2015). National approaches to evaluation of the degree of soil degradation. *Eurasian soil science*, 48, 1268-1277. <https://doi.org/10.1134/S1064229315110113>
- Moretti, E., Loreau, M. and Benzaquen, M. (2025). A global systems perspective on food demand, deforestation and agricultural sustainability. arXiv preprint arXiv:2510.14720. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.14720>
- Muchane, M.N., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L. and Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Nazaries, L., Singh, B.P., Sarker, J.R., Fang, Y., Klein, M. and Singh, B.K. (2021). The response of soil multi-functionality to agricultural management practices can be predicted by key soil abiotic and biotic properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 307, 107206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107206>
- Okur, N. (2018). A review-bio-fertilizers-power of beneficial microorganisms in soils. *Biomedical Journal Of Scientific & Technical Research*, 4(4), 4028-4029. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2018.04.001076>
- Oro, C.E.D., Saorin Puton, B.M., Venquiaruto, L.D., Dallago, R.M. and Tres, M.V. (2024). Effective microbial strategies to remediate contaminated agricultural soils and conserve functions. *Agronomy*, 14(11), 2637. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112637>
- Ortiz, A. and Sansinenea, E. (2022). The role of beneficial microorganisms in soil quality and plant health. *Sustainability*, 14(9), 5358. <https://doi.org/10.3390/su14095358>
- Pappalettere, L., Bartolini, S. and Toffanin, A. (2024). Auxin-producing bacteria used as microbial biostimulants improve the growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings in hydroponic systems. *BioTech*, 13(3), 32. <https://doi.org/10.3390/biotech13030032>
- Parven, A., Meftaul, I. M., Venkateswarlu, K. and Megharaj, M. (2025). Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), 1181-1202. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>
- Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science*, 362(6417), eaav0294. <https://doi.org/10.1126/science.aav0294>
- Reyes-Palomino, S.E. y Cano Ccoa, D.M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Ridderch, N., Theerakulpisut, P., Ma, Y.N. and Sarin, P. (2025). Bioorganic fertilizers from agricultural waste enhance rice growth under saline soil conditions. *Scientific Reports*, 15(1), 8979. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93619-9>
- Roy, D., Sinha, A.K., Rakesh, S., Rao, K.K., Sahoo, S., Bhattacharya, P.M., Mitra, B., Mukhopadhyay, P. and Padbhushan, R. (2025). Addition of biofertilizers with crop residue in conservation agriculture improves soil carbon sequestration: a long-term field study. *Tropical Ecology*, 66(1), 119-131. <https://doi.org/10.1007/s42965-025-00376-x>
- Sato, Y., Miwa, T., Inaba, T., Akachi, T., Tanaka, E., Hori, T., Murofushi, K., Takagi, H., Futamata, H., Aoyagi, T. and Habe, H. (2023). Microbially produced fertilizer provides rhizobacteria to hydroponic tomato roots by forming beneficial biofilms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107(23), 7365-7374. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12794-9>

- Schmid, B. and Schöb, C. (2023). Ecological intensification of agriculture through biodiversity management: introduction. *Journal of Plant Ecology*, 16(6), rtad018 <https://doi.org/10.1093/jpe/rtad018>
- Setiawati, M.R., Afrilandha, N., Hindersah, R., Suryatmana, P., Fitriatin, B.N. and Kamaluddin, N.N. (2023). The effect of beneficial microorganism as biofertilizer application in hydroponic-grown tomato. *SAINS TANAH – Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 20(1), 2023, 66-77. <https://dx.doi.org/10.20961/stjssa.v20i1.63877>
- Sedlář, O., Balík, J., Černý, J., Kulhánek, M. and Smatanová, M. (2023). Long-term application of organic fertilizers in relation to soil organic matter quality. *Agronomy*, 13(1), 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010175>
- Sharma, U.C., Datta, M. and Sharma, V. (2023). Soil microbes and biofertilizers. In: *Soils in the Hindu Kush Himalayas: Management for agricultural land use*. Cham: Springer International Publishing. p.117-144. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11458-8_5
- Sierka, L. (2025). Soil microbiome resilience under anthropogenic stressors. *Ukrainian Journal of Ecology*, 15(3). https://doi.org/10.15421/2025_614
- Sud, M. (2020), Managing the biodiversity impacts of fertiliser and pesticide use: Overview and insights from trends and policies across selected OECD countries. OECD Publishing, Paris. p. 155. <https://doi.org/10.1787/63942249-en>
- Tahat, M., Alananbeh, K.M., Othman, Y.A. and Leskovar, D.I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12(12), 4859. <https://doi.org/10.3390/su12124859>
- Tariq, A., Guo, S., Farhat, F. and Shen, X. (2025). Engineering synthetic microbial communities: diversity and applications in soil for plant resilience. *Agronomy*, 15(3), 513. <https://doi.org/10.3390/agronomy15030513>
- Telo da Gama, J. (2023). The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: Challenges and opportunities. *Ecologies*, 4(3), 552-567. <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>
- Tufail, M.A., Ayyub, M., Tariq, L., Iltaf, J., Asbat, A., Bashir, I. and Umar, W. (2024). Nitrogen fertilizers and the future of sustainable agriculture: a deep dive into production, pollution, and mitigation measures. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(5-6), 457-477. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2361068>
- Vargas, M.F., Mestre, M.V., Vergara, C., Maturano, P., Pettrignani, D., Pesce, V. and Vazquez, F. (2024). Residual brewer's *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as biofertilizers in horticultural seedlings: towards sustainable industry and agriculture. *Frontiers in Industrial Microbiology*, 2, 1360263. <https://doi.org/10.3389/finmi.2024.1360263>
- Vishwakarm, V. and Ranjan, R. (2024). Agroecological approaches to sustainable development. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1405409. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1405409>
- Wang, X., Yan, J., Zhang, X., Zhang, S. and Chen, Y. (2020). Organic manure input improves soil water and nutrients use for sustainable maize (*Zea mays*. L) productivity on the Loess Plateau. *PloS one*, 15(8), e0238042. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238042>
- Wang, N., Zhang, T., Cong, A. and Lian, J. (2023a). Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 289, 108566. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108566>
- Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M. and Yang, X. (2023b). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(3), 429-454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>
- Ye, L., Zhao, X., Bao, E., Li, J., Zou, Z. and Cao, K. (2020). Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality. *Scientific reports*, 10(1), 177. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56954-2>

- Zhang, Y. (2025). Effect of Biofertilizers on Rice Disease Resistance: A Comparison of Blast and Sheath Blight Resistance in China. *Journal of Progress in Engineering and Physical Science*, 4(1), 30-39. <https://doi.org/10.56397/jpeps.2025.02.05>
- Zsögön, A., Peres, L.E., Xiao, Y., Yan, J. and Fernie, A.R. (2022). Enhancing crop diversity for food security in the face of climate uncertainty. *The Plant Journal*, 109(2), 402-414. <https://doi.org/10.1111/tpj.15626>