



Abanico Microbiano. Enero-Diciembre, 2026; 3:1-24. <https://doi.org/10.21929/abanicomicrobiano/2026.3>  
Artículo de Revisión. Recibido: 19/02/2026. Aceptado: 27/05/2026. Publicado: 31/05/2026. Clave: 2026-3.  
<https://www.youtube.com/watch?v=MPc7Gj14dvM>

## Biofertilizantes microbianos y fertilidad biológica del suelo: bases, retos y perspectivas para la agricultura sostenible en México



Microbial biofertilizers and soil biological fertility: foundations,  
challenges, and perspectives for sustainable agriculture in Mexico



Zelaya-Molina Lily\*<sup>1</sup> ID, Chávez-Díaz Ismael\*\*<sup>1</sup> ID, Bautista-Ramírez  
Edgardo<sup>2</sup> ID, Cruz-Cárdenas Carlos<sup>1</sup> ID, Sandoval-Cancino  
Gabriela<sup>1</sup> ID, Aguilar-Marcelino Liliana<sup>3</sup> ID, Canales-Islas Enrique<sup>1</sup> ID

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Recursos Genéticos, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. <sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Salud Animal e Inocuidad-Sede Palo Alto, Ciudad de México, México. \*Autor Responsable: Zelaya-Molina Lily. \*\*Autor para correspondencia: Chávez-Díaz Ismael. E-mail: zelaya.lily@inifap.gob.mx, chavez.fernando@inifap.gob.mx, bautista.edgardo@inifap.gob.mx, cruz.ivan@inifap.gob.mx, sandoval.gabriela@inifap.gob.mx, aguilar.liliana@inifap.gob.mx, canales.enrique@inifap.gob.mx

### RESUMEN

La agricultura mexicana ha incrementado su productividad mediante esquemas intensivos dependientes de fertilizantes sintéticos; sin embargo, este modelo ha contribuido al deterioro de la calidad del suelo, la pérdida de biodiversidad funcional y la reducción de la resiliencia de los agroecosistemas. En este contexto, los microorganismos benéficos y los biofertilizantes emergen como herramientas clave para fortalecer la fertilidad biológica del suelo y mejorar la eficiencia en el uso de nutrimentos. El objetivo de este trabajo es analizar el papel de los microorganismos agrícolas en la fertilidad del suelo y evaluar el potencial de los biofertilizantes como alternativa para el manejo sostenible de los sistemas productivos en México. Las comunidades microbianas asociadas a plantas participan en procesos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de nutrimentos y la regulación de la fisiología vegetal, lo que repercute en el crecimiento, la sanidad y la calidad de los cultivos. A pesar de la disponibilidad de recursos genéticos microbianos y capacidades científicas relevantes en el país, la adopción de biofertilizantes aun es limitada debido a factores culturales técnicos, regulatorios y de transferencia tecnológica. La integración de estrategias basadas en microorganismos en los sistemas agrícolas representa una vía para avanzar hacia esquemas productivos más sostenibles.

**Palabras clave:** microbiota vegetal, fertilidad biológica del suelo, sostenibilidad agrícola.

### ABSTRACT

Mexican agriculture has increased its productivity through intensive systems dependent on synthetic fertilizers; however, this model has contributed to soil degradation, loss of functional biodiversity, and reduced agroecosystem resilience. In this context, beneficial microorganisms and biofertilizers emerge as key tools to enhance soil biological fertility and improve nutrient use efficiency. The objective of this study is



to analyze the role of agricultural microorganisms in soil fertility and to evaluate the potential of biofertilizers as an alternative for sustainable management of agricultural systems in Mexico. Microbial communities associated with plants participate in processes such as biological nitrogen fixation, nutrient solubilization, and regulation of plant physiology, which influence crop growth, health, and quality. Despite the availability of microbial genetic resources and relevant scientific capacities in the country, the adoption of biofertilizers remains limited due to cultural, technical, regulatory, and technology transfer constraints. The integration of microorganism-based strategies into agricultural systems represents a pathway toward more sustainable production schemes.

**Keywords:** plant microbiota, soil biological fertility, agricultural sustainability.

## INTRODUCCION

A partir de la Revolución Verde, la producción agrícola global experimentó incrementos sin precedentes, lo que permitió satisfacer la demanda alimentaria de una población en crecimiento (Molina-Zapata, 2021). México desempeñó un papel central en este proceso y desde la década de 1950 adoptó un modelo de producción agrícola intensivo basado en la labranza mecanizada, la expansión del riego, el monocultivo, así como el uso de variedades mejoradas, de agroquímicos con actividad biocida y fertilizantes sintéticos (Urias-Rivas *et al.*, 2024). Este enfoque permitió elevar la productividad, diversificar la producción agrícola y fortalecer la inserción del país en los mercados internacionales (Gómez-Oliver, 2016), lo que generó beneficios económicos y sociales que aún sustentan los sistemas agroalimentarios actuales (Reyes & Cortes, 2017). No obstante, la implementación prolongada de este modelo ha generado efectos ambientales y ecológicos adversos, entre ellos la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad funcional y el incremento en la incidencia de plagas y enfermedades vegetales (Valenzuela-Ruiz *et al.*, 2020). En este contexto, la seguridad alimentaria en México enfrenta desafíos asociados al deterioro ambiental inducido por el uso intensivo de insumos sintéticos (Chávez-Díaz *et al.*, 2020), que se han agravado por el cambio climático y la degradación edáfica (Cotler *et al.*, 2020).

Paralelamente, el avance de la microbiología agrícola y la ecología microbiana ha impulsado estrategias orientadas a fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas mediante el aprovechamiento de microorganismos asociados a las plantas (Enebe & Babalola, 2018), ya que las comunidades microbianas rizosféricas, endosféricas y filosféricas realizan funciones que repercuten tanto en el rendimiento como en la acumulación de compuestos nutricionales en los tejidos comestibles (Bhattacharyya & Furtak, 2022), a través de procesos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de nutrientes minerales, la producción de fitohormonas, la inducción de resistencia sistémica, el antagonismo frente a fitopatógenos, entre otros (Moreno-Reséndez *et al.*, 2018). Debido a esto, los inoculantes microbianos se han consolidado como componentes relevantes de la agricultura sostenible (Ibáñez *et al.*, 2023). En México, los biofertilizantes microbianos han adquirido relevancia como herramientas para transitar hacia esquemas productivos más sustentables; sin embargo, su adopción aun



es heterogénea y enfrenta retos de validación en campo, estandarización, distribución y regulación específica (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). Además, la conservación y aprovechamiento de los recursos genéticos microbianos nativos agrícolas, permanecen escasamente articulados con procesos de transferencia tecnológica y marcos normativos nacionales (Córdova-Albores *et al.*, 2021).

En este marco, el presente artículo analiza la situación actual de la agricultura mexicana frente a la presión productiva y ambiental, con énfasis en el papel de los microorganismos utilizados como biofertilizantes. Se examinan los avances científicos, los retos regulatorios y productivos, y las perspectivas para su integración en sistemas agrícolas sustentables en México, con el objetivo de identificar los principales desafíos y oportunidades para su implementación a mayor escala.

### **AGRICULTURA MEXICANA: PRESIÓN PRODUCTIVA Y DEGRADACIÓN DEL SUELO**

La elevada biodiversidad de México se explica en gran medida por la heterogeneidad climática, geológica y edáfica que caracteriza a su territorio (Morrone, 2019), lo que ha permitido reconocer al país como uno de los principales centros globales de diversidad biológica y endemismo vegetal (Sarukhán *et al.*, 2017). Esta diversidad ha influido de manera directa en el desarrollo agrícola desde tiempos prehispánicos, como base en procesos de domesticación vegetal y sistemas productivos tradicionales (Mastretta-Yanes *et al.*, 2021). En la actualidad, cultivos como maíz, caña de azúcar, aguacate, chile, jitomate, sorgo, trigo, frijol y alfalfa concentran una proporción importante del valor económico del sector agrícola y constituyen pilares de la seguridad alimentaria nacional (Favila-Tello, 2024). Asimismo, el reconocimiento del valor estratégico de la biodiversidad agrícola ha impulsado el desarrollo de instrumentos de política pública orientados a su conservación y aprovechamiento sostenible, entre ellos la Estrategia Mexicana para la Conservación Vegetal 2012-2030 (Arizpe *et al.*, 2023; Escárraga-Torres *et al.*, 2022), alineada con compromisos internacionales derivados del Convenio sobre la Diversidad Biológica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Durante las últimas décadas, el valor de la producción agrícola en México se ha incrementado de manera significativa, impulsado por la adopción de variedades mejoradas, la tecnificación del riego y la intensificación del manejo agronómico con un mayor uso de agroquímicos (Sosa-Baldivia & Ruíz-Ibarra, 2017). Sin embargo, este crecimiento productivo ocurre en un contexto de crecientes limitaciones. La superficie cultivada ha mostrado una tendencia a la reducción como resultado de procesos de urbanización, reconversión productiva, menor disponibilidad de agua para riego y cambios en el uso del suelo, mientras que una proporción considerable de los suelos agrícolas del país presenta algún grado de degradación química, física o erosiva (Cotler *et al.*, 2020). A estas presiones se suman la variabilidad climática y el aumento en la frecuencia de eventos extremos asociados al cambio climático, así como el crecimiento poblacional e incremento en la demanda de alimentos (Hernández-Aguilar *et al.*, 2026).



En conjunto, estos factores indican que en las próximas décadas la producción agrícola deberá incrementarse principalmente mediante mayores rendimientos por unidad de superficie (Brambila-Paz *et al.*, 2018; Díaz-Carreño *et al.*, 2026). En este contexto, la dependencia de fertilizantes sintéticos ha crecido de manera sostenida, lo que ha resultado en implicaciones económicas, ambientales y geopolíticas asociadas a la importación de insumos estratégicos (Álvarez-González *et al.*, 2023). Frente a este escenario, diversas políticas públicas han promovido el uso eficiente de fertilizantes, la conservación del suelo y el desarrollo de bioinsumos agrícolas (SADER, 2025). En consecuencia, la integración de enfoques basados en biodiversidad funcional y procesos biológicos, así como el aprovechamiento de microorganismos benéficos, representa una oportunidad estratégica para fortalecer la productividad y resiliencia de los agroecosistemas mexicanos.

### **EL SUELO COMO SISTEMA BIOGEOQUÍMICO EN LA AGRICULTURA**

El suelo constituye un sistema dinámico resultado de la interacción entre material parental, clima, topografía y actividad biológica, cuya organización en horizontes sustenta procesos fundamentales para la producción agrícola (Sánchez-Gómez *et al.*, 2025). Desde una perspectiva agronómica, se concibe como una matriz integrada por fracciones minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos que regulan el crecimiento vegetal y múltiples flujos biogeoquímicos. Entre los servicios ecosistémicos que proporciona se incluyen la regulación hidrológica, el secuestro de carbono, el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de la biodiversidad, procesos mediados en gran medida por la microbiota edáfica (Maia-de Andrade *et al.*, 2019).

La degradación del suelo, considerada uno de los principales factores limitantes para la seguridad alimentaria, resalta la importancia de conservar sus propiedades físicas, químicas y biológicas para sostener la actividad microbiana y la productividad agrícola (Cotler *et al.*, 2020). Factores como la estructura, la porosidad, la retención de agua y el contenido de materia orgánica condicionan la aireación del suelo, el desarrollo radicular y la actividad microbiana, mientras que procesos como la compactación, la pérdida de cohesión entre los agregados o la disminución de materia orgánica pueden reducir la actividad biológica y la eficiencia en el uso de nutrientes (Sánchez Tigrero *et al.*, 2025). Por su parte, la biodiversidad del suelo está dominada por bacterias, arqueas, hongos y otros microorganismos que participan en procesos como la mineralización de materia orgánica, la fijación biológica de nitrógeno, la nitrificación, la desnitrificación y la solubilización de nutrientes (Orduz-Tovar *et al.*, 2021). La composición y actividad de estas comunidades es altamente sensible al manejo agrícola; prácticas como la labranza intensiva, el uso excesivo de fertilizantes sintéticos o la simplificación de rotaciones alteran su diversidad y estabilidad funcional (Khmelevtsova *et al.*, 2022).

La calidad del suelo es deteriorada por procesos como la pérdida de carbono orgánico, la acidificación, la salinización, la compactación, la erosión y la contaminación por



agroquímicos, lo que limita la productividad agrícola a largo plazo (Bünemann *et al.*, 2018). Por ello, la conservación de la funcionalidad biológica del suelo constituye un eje central de la agricultura sostenible. Prácticas como la reducción de la labranza, la incorporación de residuos orgánicos, la diversificación de cultivos y el uso de microorganismos benéficos favorecen el reciclaje de nutrientes, la estabilidad estructural del suelo y la eficiencia en el uso de nutrientes. Estas establecen las bases necesarias para el desarrollo y aplicación de estrategias alternativas como el uso de biofertilizantes.

### **FERTILIZANTES SINTÉTICOS Y SU IMPACTO LOS SUELOS DE MÉXICO**

La fertilidad del suelo constituye uno de los pilares de la producción agrícola moderna. En sistemas intensivos, la aplicación de fertilizantes sintéticos ha permitido sostener altos rendimientos, compensar la extracción continua de nutrientes por los cultivos y estabilizar la productividad frente a la demanda alimentaria (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2018); por lo que actualmente son una de las herramientas más importantes para el desarrollo de la agricultura, fomentar la seguridad alimentaria y mantener la productividad del suelo. En México se emplean varios millones de toneladas de fertilizantes anualmente, con predominio de fuentes nitrogenadas seguidas de fósforo y potasio (Álvarez-González *et al.*, 2023). El consumo promedio supera los 100 kg por hectárea en sistemas comerciales, aunque con marcadas diferencias regionales y entre cultivos. Esta dependencia expone al sector agrícola nacional a la volatilidad de los mercados internacionales de energía y materias primas, al tiempo que representa un rubro significativo dentro de los costos de producción (Álvarez-González *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista agronómico, la fertilización permite mejorar la disponibilidad de nutrientes; sin embargo, su eficiencia de uso suele ser limitada. Una proporción considerable del nitrógeno aplicado no es absorbida por los cultivos y se pierde por lixiviación, volatilización o desnitrificación (Singh, 2018), lo que resulta en la contaminación de acuíferos, la eutrofización de cuerpos de agua y la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente óxido nitroso (Bristow *et al.*, 2017). La acumulación de nitratos en aguas subterráneas constituye uno de los principales problemas ambientales asociados al uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y puede tener implicaciones para la salud humana (Morales-Arredondo *et al.*, 2020). En el caso de los fertilizantes fosfatados, su impacto ambiental se relaciona principalmente con procesos de eutrofización y acumulación de fósforo en sedimentos. Además de sus efectos ambientales, el uso continuo de fertilizantes sintéticos puede modificar propiedades químicas y biológicas del suelo. Además, la acidificación inducida por fertilizantes, el desequilibrio en relaciones catiónicas y la disminución del carbono orgánico afectan la estructura microbiana y la actividad enzimática del suelo, lo que agrava la reducción de la diversidad funcional de la microbiota edáfica y la resiliencia del sistema frente a perturbaciones ambientales (Hu *et al.*, 2024). En México, estos efectos se combinan con



procesos de degradación del suelo asociados a prácticas agrícolas intensivas y presiones climáticas y socioeconómicas, lo que incrementa los riesgos de pérdida de fertilidad a largo plazo (Cotler *et al.*, 2020).

Aunque la fertilización química ha sido fundamental para sostener la producción agropecuaria nacional, su uso ineficiente plantea interrogantes sobre la viabilidad ambiental y económica del modelo actual. Diversos análisis indican que mejorar la eficiencia en el uso de nutrimentos podría reducir el consumo de fertilizantes sin afectar el rendimiento, lo que abre la posibilidad de integrar estrategias complementarias basadas en procesos biológicos. En este contexto, el fortalecimiento de la fertilidad biológica del suelo mediante microorganismos capaces de fijar nitrógeno, solubilizar fósforo, movilizar potasio o modular la fisiología vegetal emerge como una alternativa estratégica (Ibáñez *et al.*, 2023) que promete avanzar hacia esquemas más eficientes y sostenibles.

### **ESTRATEGIAS SOSTENIBLES EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA**

La agricultura convencional ha incrementado la producción mediante el manejo intensivo del agua, la fertilización y el control químico de malezas y fitopatógenos. Sin embargo, los impactos ambientales y edáficos asociados a estas prácticas han impulsado el desarrollo de estrategias orientadas a conservar los recursos naturales y reducir el uso de agroquímicos (Figura 1).

Entre estas alternativas destacan el manejo conservacionista del suelo, la aplicación de microorganismos benéficos, el uso de extractos vegetales y, más recientemente, el empleo de nanomateriales agrícolas, orientadas a mantener la productividad sin comprometer la funcionalidad biológica del suelo (Rodríguez-González & Díaz-Cervantes, 2024; Pérez Hernández *et al.*, 2025; Erazo *et al.*, 2026). El uso prolongado de fertilizantes y plaguicidas sintéticos, así como prácticas como la roza, tumba y quema, puede reducir la biomasa y diversidad microbiana, además de alterar los ciclos de nutrimentos y la estabilidad estructural del suelo (Saleem *et al.*, 2019).

Entre las prácticas más estudiadas se encuentra la labranza de conservación, que incluye sistemas como la labranza mínima y la labranza cero, orientados a reducir la perturbación física del suelo y favorecer la acumulación de carbono y nitrógeno. Estos sistemas promueven mayor estabilidad estructural y actividad microbiana (Legrand *et al.*, 2018). Otra estrategia es la aplicación de biofertilizantes que contienen microorganismos promotores del crecimiento vegetal capaces de mejorar la disponibilidad de nutrimentos y la fisiología de las plantas y aumentar la tolerancia al estrés (Moreno-Reséndez *et al.*, 2018).

Otras aproximaciones incluyen el uso de extractos vegetales con actividad antimicrobiana para el manejo de plagas y enfermedades, así como el desarrollo de nanomateriales agrícolas capaces de mejorar la eficiencia en la liberación de nutrimentos. Diversos metabolitos secundarios de plantas presentan actividad antifúngica y antibacteriana

(Kuzhuppillymyal-Prabhakarankutty *et al.*, 2023), mientras que algunas nanopartículas han mostrado potencial para optimizar la absorción vegetal y reducir pérdidas por lixiviación (Wang *et al.*, 2023). En conjunto, estas estrategias pueden contribuir a restaurar la funcionalidad biológica del suelo, fortalecer la resiliencia de los agroecosistemas, mejorar la eficiencia nutrimental y reducir la dependencia de insumos químicos; sin embargo, su adopción en México aún es limitada.

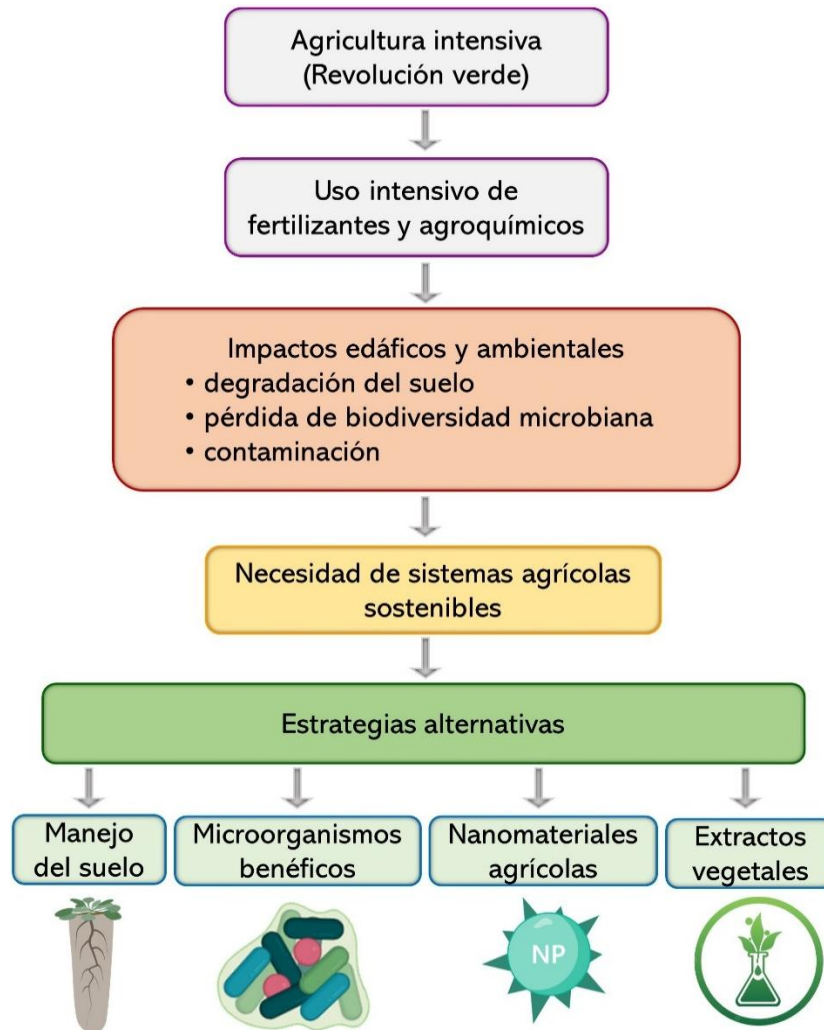
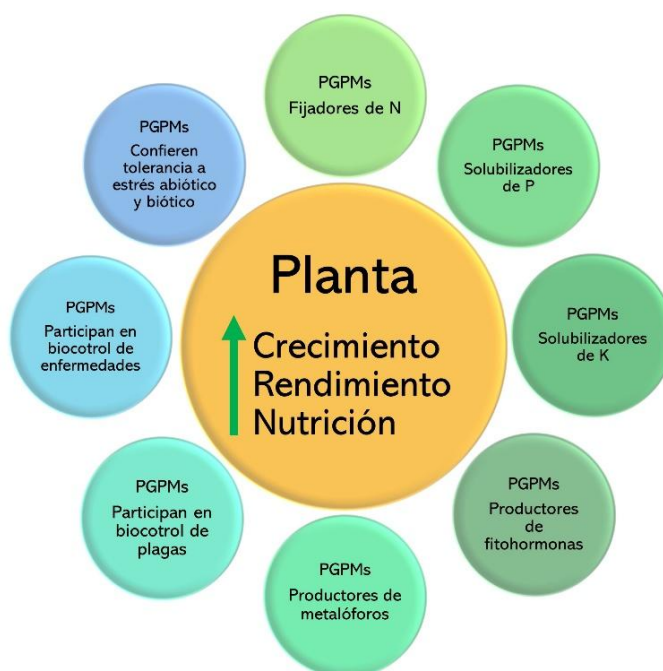


Figura 1. Panorama general del manejo agrícola intensivo que ha impulsado el desarrollo de estrategias orientadas a mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas

### BIOFERTILIZANTES MICROBIANOS COMO BASE FUNCIONAL AGRÍCOLA

El uso de biofertilizantes microbianos ha experimentado un crecimiento sostenido a nivel global como respuesta a los límites agronómicos, ambientales y económicos del modelo de fertilización química intensiva, así como por políticas orientadas a la sostenibilidad agrícola y la conservación del suelo. Estos insumos biológicos, formulados con microorganismos vivos, se han consolidado como herramientas para reducir la

dependencia de fertilizantes sintéticos y fortalecer la funcionalidad biológica del suelo. En la mayoría de los casos, los biofertilizantes se basan en microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPMs), que incluyen principalmente bacterias y hongos capaces de establecer asociaciones con las plantas (Mitra *et al.*, 2021). Estos organismos contribuyen a la nutrición y desarrollo vegetal mediante mecanismos como fijación biológica de nitrógeno, solubilización de fósforo y potasio, producción de fitohormonas, síntesis de metalóforos y enzimas hidrolíticas, así como inducción de tolerancia al estrés abiótico o resistencia frente a patógenos (Figura 2). A diferencia de los fertilizantes químicos, cuya acción se basa en el aporte directo de nutrientes minerales, los biofertilizantes actúan mediante la activación de procesos biológicos que regulan la dinámica nutrimental del agroecosistema (Moreno-Reséndez *et al.*, 2018).



**Figura 2. Principales funciones de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal en la nutrición, crecimiento y protección de las plantas**

En años recientes se han aislado y caracterizado microorganismos con potencial agronómico, desarrollado formulaciones y evaluado su desempeño en condiciones experimentales y de campo (Rodríguez-Escucha *et al.*, 2026). No obstante, la transición hacia su adopción masiva enfrenta desafíos estructurales, entre ellos la falta de estandarización en la calidad microbiológica de los productos, la escasa regulación específica para biofertilizantes, la variabilidad en la eficacia agronómica bajo condiciones ambientales contrastantes y la limitada articulación entre academia, industria y sector productivo.



Otro aspecto relevante es la conservación y aprovechamiento de los recursos genéticos microbianos nativos. México alberga una elevada diversidad de microorganismos asociados a plantas y suelos agrícolas como resultado de su heterogeneidad climática y biogeográfica, lo que representa una fuente estratégica para el desarrollo de biofertilizantes adaptados a condiciones locales y cultivos regionales. Sin embargo, la bioprospección, caracterización y resguardo de estos recursos aún se encuentran fragmentados y requieren marcos institucionales y normativos que faciliten su utilización sostenible (Córdova-Albores *et al.*, 2021).

### BIOFERTILIZACIÓN Y BIOFORTIFICACIÓN NUTRICIONAL

En un contexto global donde la seguridad alimentaria implica no sólo la disponibilidad de alimentos sino también su valor nutricional, la biofortificación ha emergido como una estrategia relevante para incrementar el contenido de nutrimentos esenciales en los cultivos destinados al consumo humano (Ofori *et al.*, 2022). Este enfoque busca aumentar la densidad de micronutrientes, vitaminas y compuestos bioactivos en los tejidos comestibles mediante estrategias genéticas, agronómicas o biológicas. Entre estas aproximaciones, la biofortificación microbiana ha recibido creciente atención debido a su capacidad para mejorar simultáneamente la nutrición vegetal, la salud del suelo y la calidad de los alimentos.

Diversos estudios han documentado que la inoculación con PGPMs puede modificar la composición química de los cultivos al incrementar la acumulación de macro y micronutrientes esenciales. Por ejemplo, microorganismos diazotróficos como *Azotobacter* y *Azospirillum* han mostrado mejorar la asimilación de nitrógeno y aumentar el contenido proteico en cereales y leguminosas (Vessal *et al.*, 2024). De manera similar, bacterias solubilizadoras de fósforo y movilizadoras de potasio pueden incrementar la concentración de estos elementos en tejidos vegetales (Bakhshandeh *et al.*, 2020). Además de los nutrimentos minerales, los PGPMs pueden estimular la biosíntesis de metabolitos secundarios con valor nutracéutico. Diversas interacciones planta-microorganismo han mostrado incrementar la acumulación de vitaminas, compuestos fenólicos, carotenoides y antioxidantes en frutas y hortalizas (Riboni *et al.*, 2023). Por ejemplo, consorcios microbianos han incrementado el contenido de vitamina C en tomate y carotenoides en distintos cultivos hortícolas, mientras que asociaciones con micorrizas o bacterias rizosféricas pueden estimular la producción de flavonoides y antocianinas (Andryei *et al.*, 2021).

En conjunto, los PGPMs pueden actuar como herramientas biotecnológicas para mejorar simultáneamente la productividad agrícola, la fertilidad biológica del suelo y la calidad nutricional de los cultivos. La integración de estrategias de biofertilización en sistemas agrícolas sustentables podría contribuir tanto a la eficiencia nutrimental de los agroecosistemas como al desarrollo de alimentos con mayor valor y calidad nutricional.



## REGULACIÓN DE BIOFERTILIZANTES EN LA AGRICULTURA MEXICANA

La adopción de biofertilizantes en México ha sido históricamente limitada y heterogénea, principalmente debido a las dificultades en la difusión y transferencia de estas innovaciones biológicas hacia el sector productivo, y a la dependencia del desempeño de los inoculantes microbianos de múltiples factores ambientales y de manejo (Coutiño-Puchuli *et al.*, 2023). Asimismo, el conocimiento técnico sobre el manejo de los biofertilizantes aun es limitado en los sectores agrícolas. Entre las limitaciones también se encuentra una infraestructura aún incipiente para la producción, formulación y distribución de biofertilizantes a escala comercial, y la calidad de los productos disponibles puede ser variable, lo que afecta la confianza de los usuarios y limita la consolidación de los biofertilizantes como componentes estables del manejo nutrimental agrícola (Narayana *et al.*, 2025).

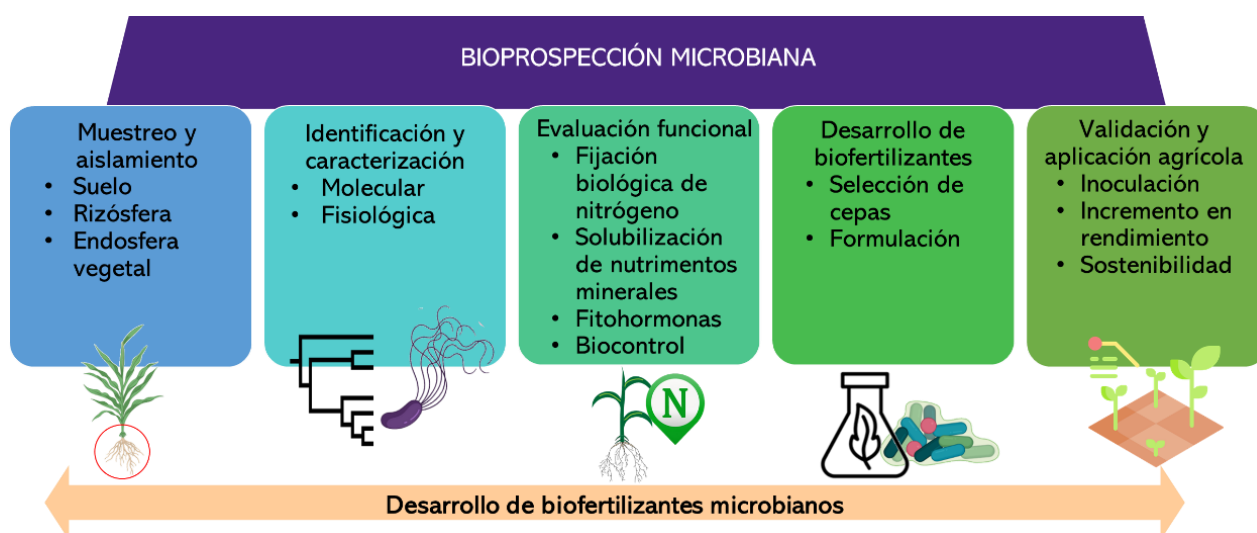
Desde el punto de vista institucional, uno de los principales obstáculos para el desarrollo del sector de biofertilizantes en México es la ausencia de un marco normativo específico. Las regulaciones vigentes, diseñadas principalmente para fertilizantes químicos, no contemplan parámetros de calidad en productos microbiológicos, como identidad de cepa, viabilidad celular, concentración mínima de microorganismos o estabilidad del producto durante su almacenamiento y aplicación. Este vacío regulatorio dificulta la certificación de calidad y la evaluación objetiva de los productos disponibles en el mercado, lo que reduce la certidumbre para productores y empresas desarrolladoras de biofertilizantes (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). A pesar de estas limitaciones, el contexto actual ofrece oportunidades importantes para la expansión de los biofertilizantes en la agricultura mexicana. Las políticas orientadas a la conservación del suelo, la reducción del uso de agroquímicos y la promoción de insumos biológicos han generado un entorno más favorable para el desarrollo de alternativas basadas en procesos biológicos (SADER, 2025).

En este escenario, el fortalecimiento de la investigación aplicada, la validación regional de tecnologías microbianas, el desarrollo de estándares de calidad microbiológica y la articulación entre instituciones de investigación, sector productivo e industria serán factores determinantes para consolidar el uso de biofertilizantes en la agricultura mexicana (Figura 3). Su integración en esquemas de manejo nutrimental racional, más que su sustitución completa por fertilizantes sintéticos, representa una estrategia viable para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, fortalecer la fertilidad biológica del suelo y avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles.

## CAPACIDADES CIENTÍFICAS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA EN MÉXICO

La microbiología agrícola en México cuenta con una comunidad científica consolidada que, desde mediados del siglo XX, ha contribuido al estudio de los microorganismos asociados a plantas y su papel en la fertilidad del suelo y la productividad agrícola. A partir de investigaciones sobre fijación biológica de nitrógeno, micorrizas arbusculares,

ecología microbiana del suelo e interacciones planta-microorganismo, diversos grupos han generado conocimiento básico orientado a comprender la diversidad y función de las comunidades microbianas en agroecosistemas (Córdova-Albores *et al.*, 2021). Una de las líneas más consolidadas es el estudio de bacterias asociadas a plantas y de la fijación biológica de nitrógeno, donde destacan las contribuciones realizadas en el Centro de Investigación sobre Fijación de Nitrógeno (actual Centro de Ciencias Genómicas) de la Universidad Nacional Autónoma de México por Esperanza Martínez-Romero y José de Jesús Caballero-Mellado, cuyos trabajos han ampliado significativamente el conocimiento sobre la diversidad, evolución y funciones ecológicas de bacterias simbióticas y endófitas asociadas a plantas, particularmente en leguminosas (Rosenblueth & Martínez-Romero, 2006; Martínez-Romero *et al.*, 1991; Caballero-Mellado *et al.*, 1995; López-Reyes *et al.*, 2014).



**Figura 3. Etapas generales en el desarrollo de biofertilizantes microbianos**

El estudio de micorrizas arbusculares y de la fertilidad biológica del suelo son otra línea relevante dentro de la microbiología agrícola en México, donde destacan las investigaciones de Ronald Ferrera-Cerrato del Colegio de Postgraduados, y su grupo de trabajo: Alejandro Alarcón, Julián Delgadillo-Martínez, Ma. Encarnación Lara-Hernández, por mencionar algunos (Bethlenfalvay *et al.*, 1991; Hernández-Melchor *et al.*, 2019), así como las de John Larsen en el Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México (Contreras-Cornejo *et al.*, 2016; Gryndler *et al.*, 2006), Dora Trejo-Aguilar en la Universidad Veracruzana (Varela & Trejo, 2001; Trejo *et al.*, 2011) y Gabriel Rincón Enríquez del Centro de Investigaciones y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2014; Quiñones-Aguilar *et al.*, 2019), quienes han contribuido al conocimiento de la ecología, diversidad y función de los hongos micorrízicos y promotores de crecimiento en agroecosistemas. De manera complementaria, Luc Dendooven (Govaerts *et al.*, 2009;



Gutiérrez-Miceli *et al.*, 2007) y Víctor Olalde-Portugal (Mena-Violante & Olalde-Portugal, 2007; Félix-Herrán *et al.*, 2008), en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, han contribuido al estudio de la ecología microbiana del suelo y de los procesos biogeoquímicos asociados a la fertilidad edáfica, particularmente la dinámica de las comunidades microbianas.

Más recientemente, diversos grupos han investigado microorganismos promotores del crecimiento vegetal y los mecanismos que regulan las interacciones planta-microorganismo. Entre ellos se encuentran los trabajos de José López-Bucio (López-Bucio *et al.*, 2003; Contreras-Cornejo *et al.*, 2009) y Gustavo Santoyo (Santoyo *et al.*, 2012; Santoyo *et al.*, 2016) en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, enfocados en los mecanismos fisiológicos y moleculares que regulan la interacción planta-bacteria. En esta línea también se ubican las investigaciones de César Hernández-Rodríguez de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional sobre bacterias asociadas a plantas con potencial promotor del crecimiento vegetal (Navarro-Noya *et al.*, 2010; De la Vega-Camarillo *et al.*, 2023). Así como los estudios de biocontrol microbiano y fitopatología agrícola aplicados desarrollados por Luis G. Hernandez-Montiel del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Carmona-Hernandez *et al.*, 2019; Rivas-García *et al.*, 2019), Rubén Félix-Gastélum de la Universidad Autónoma de Occidente (Félix-Gastélum *et al.*, 2016; Félix-Gastélum *et al.*, 2024), Rufina Hernández-Martínez del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Rangel-Montoya *et al.*, 2021; Rangel-Montoya *et al.*, 2022), y Hortencia Gabriela Mena-Violante (Oregel-Zamudio *et al.*, 2017), Valentina Angóa-Pérez (Ariza-Mejía *et al.*, 2022) Melina López-Meyer (Cervantes-Gámez *et al.*, 2015) e Ignacio Eduardo Maldonado-Mendoza (Figuroa-López *et al.*, 2016) del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional.

Algunos grupos han orientado parte de sus investigaciones hacia la evaluación agronómica y el desarrollo de bioinsumos microbianos, como los trabajos de Yoav Bashan del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Bashan, 1998; Bashan *et al.*, 2013), Moisés Graciano Carcaño-Montiel de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (Carcaño-Montiel *et al.*, 2006; Martínez-Reyes *et al.*, 2018), y de Gerardo Armando Aguado-Santacruz del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Aguado-Santacruz *et al.*, 2012; Díaz-Franco *et al.*, 2013). En esta línea también se ubican las investigaciones desarrolladas en el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México por el Dr. Enrique Galindo-Fentanes, relacionadas con el desarrollo biotecnológico, escalamiento y producción de microorganismos con potencial para su aplicación en sistemas agrícolas (Carrillo-Fasio *et al.*, 2005; Balón-Rosas *et al.*, 2023). De manera paralela, el grupo liderado por Sergio de los Santos-Villalobos en el Instituto Tecnológico de Sonora ha contribuido en el estudio de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, biocontrol microbiano. Destaca su labor en la consolidación de la colección de microorganismos COLMENA, una de las más



relevantes a nivel nacional, misma que conserva accesiones de microorganismos edáficos y endófitos con potencial de desarrollo de inoculantes bacterianos con aplicaciones potenciales en agricultura (Villareal-Delgado *et al.*, 2018; Villa-Rodríguez *et al.*, 2019).

En conjunto, estos grupos han contribuido al desarrollo de la microbiología agrícola en México y a la formación de nuevas generaciones de investigadores en microbiología del suelo y biotecnología microbiana, que ahora están en diversas instituciones nacionales e internacionales. No obstante, la transferencia de este conocimiento hacia el sector productivo aún enfrenta diversos desafíos, los biofertilizantes representan una de las principales vías para trasladar el conocimiento generado en microbiología agrícola hacia aplicaciones orientadas a mejorar la fertilidad biológica del suelo y la sostenibilidad de los sistemas productivos.

## CONCLUSIONES

La agricultura mexicana enfrenta el reto de mantener la productividad agrícola mediante sistemas de manejo más sostenibles, que contribuyan a lograr la seguridad alimentaria. En este contexto, los biofertilizantes representan herramientas con alto potencial para mejorar la eficiencia en la asimilación de nutrimentos, fortalecer la fertilidad biológica del suelo y contribuir a sistemas productivos más sostenibles que permitan producir alimentos de mayor calidad. Aunque México cuenta con una amplia diversidad de recursos genéticos microbianos y con una comunidad científica consolidada en microbiología agrícola, la adopción de biofertilizantes a escala productiva aún es limitada debido a factores tecnológicos, regulatorios y de transferencia. El fortalecimiento de la investigación aplicada, la validación en condiciones de campo y el desarrollo de marcos normativos específicos serán elementos clave para consolidar el uso de biofertilizantes microbianos en la agricultura mexicana y avanzar hacia sistemas agrícolas basados en procesos biológicos y en el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad microbiana del suelo.

## REFERENCIAS

AGUADO-SANTACRUZ GA, Moreno-Gómez B, Jiménez-Francisco B, García-Moya E, Preciado-Ortiz RE. 2012. Impacto de los sideróforos microbianos y fitosidéforos en la asimilación de hierro por las plantas: una síntesis. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35(1):9-21. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.9>

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ X, García-Salazar JA, Omaña-Silvestre JM, Mora-Flores JS, Almeraya-Quintero SX, Borja-Bravo M. 2023. Current and potential demand of fertilizers in Mexico. *Agro Productividad*. 16(4):149-156. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i4.2352>



ANDRYEI B, Horváth KZ, Agyemang-Duah S, Takács S, Égei M, Szuvandzsiev P, Neményi A. 2021. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) in the mitigation of water deficiency of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Central European Agriculture*. 22(1):167-177. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/22.1.3036>

ARIZA-MEJÍA D, Oyoque-Salcedo G, Angóa-Pérez V, Mena-Violante HG, Álvarez-Bernal D, Torres-García JR. 2022. Diversity and potential function of the bacterial rhizobiome associated to *Physalis ixocarpa* Broth. in a milpa system, in Michoacan, Mexico. *Agronomy*. 12(8):1780. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081780>

ARIZPE N. Peña-Fuentes A, González-Jiménez JF. 2023. Políticas de conservación de la biodiversidad e inclusión de las comunidades en las áreas naturales protegidas de México. *Ecología Política*. 66:76-83. <https://doi.org/10.53368/EP66CEPBbr04>

BAKHSCHANDEH E, Pirdashti H, Shahsavarpour-Lendeh K, Gilani Z, Yaghoubi-Khanghahi M, Crecchio C. 2020. Effects of plant growth promoting microorganisms inoculums on mineral nutrition, growth and productivity of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Nutrition*. 43:1643-1660. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1739297>

BALÓN-ROSAS LY, Luna-Bulbarela A, Serrano-Carreón L, Galindo-Fentanes E. 2023. Descifrando la comunicación celular en Bacillus: Influencia del pH en la esporulación y la heterogeneidad celular. *BioTecnología*. 27(5):98-104. <https://smbb.mx/revista-biotecnologia-2023-vol-27-no-5/>

BASHAN Y, de-Bashan LE, Prabhu SR, Hernandez JP. 2014. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013). *Plant and Soil*. 378(1):1-33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>

BASHAN Y. 1998. Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnology Advances*. 16(4):729-770. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(98\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(98)00003-2)

BETHLENFALVAY GJ, Reyes-Solis MG, Camel SB, Ferrera-Cerrato R. 1991. Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium. *Physiologia Plantarum*. 82(3):423-432. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb02928.x>

BHATTACHARYYA SS, Furtak K. 2022. Soil-Plant-Microbe interactions determine soil biological fertility by altering rhizospheric nutrient cycling and biocrust formation. *Sustainability*. 15(1):625. <https://doi.org/10.3390/su15010625>



BRAMBILA-PAZ JJ, Martínez-Damían MÁ, Rojas-Rojas MM, Pérez-Cerecedo V. 2018. El valor de la producción agrícola y pecuaria en México: fuentes del crecimiento, 1980-2010. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(4):619-631.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v5i4.923>

BRISTOW LA, Mohr W, Ahmerkamp S, Kuypers MM. 2017. Nutrients that limit growth in the ocean. *Current Biology*. 27(11):R474-R478. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.03.030>

BÜNEMANN EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, De Deyn G, De Goede R, Fleskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, van Groenigen JW, Brussaard L. 2018. Soil quality-A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120:105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

CABALLERO-MELLADO J, Fuentes-Ramirez LE, Reis VM, Martinez-Romero E. 1995. Genetic structure of *Acetobacter diazotrophicus* populations and identification of a new genetically distant group. *Applied and Environmental Microbiology*. 61(8):3008-3013. <https://doi.org/10.1128/aem.61.8.3008-3013.1995>

CARCAÑO-MONTIEL MG, Ferrera-Cerrato R, Pérez-Moreno J, Molina-Galán JD, Bashan Y. 2006. Actividad nitrogenasa, producción de fitohormonas, sideróforos y antibiosis en cepas de *Azospirillum* y *Klebsiella* aisladas de maíz y teocintle. *Terra Latinoamericana*. 24(4):493-502.

<https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/issue/view/71>

CARMONA-HERNANDEZ S, Reyes-Pérez JJ, Chiquito-Contreras RG, Rincon-Enriquez G, Cerdan-Cabrera CR, Hernandez-Montiel LG. 2019. Biocontrol of postharvest fruit fungal diseases by bacterial antagonists: A review. *Agronomy*. 9(3):121.

<https://doi.org/10.3390/agronomy9030121>

CARRILLO-FASIO JA, García-Estrada RS, Muy-Rangel MD, Sañudo-Barajas A, Márquez-Zequera I, Allende-Molar R, de la Garza-Ruiz Z, Patiño-Vera M, Galindo-Fentanes E. 2005. Control biológico de antracnosis [*Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc.] y su efecto en la calidad poscosecha del mango (*Mangifera indica* L.) en Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 23(1):24-32.

<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20063214126>

CERVANTES-GÁMEZ RG, Bueno-Ibarra MA, Cruz-Mendivil A, Calderón-Vázquez CL, Ramírez-Douriet CM, Maldonado-Mendoza IE, Villalobos-López MÁ, Valdez-Ortíz Á, López-Meyer, M. 201). Arbuscular mycorrhizal symbiosis-induced expression changes in *Solanum lycopersicum* leaves revealed by RNA-seq analysis. *Plant Molecular Biology Reporter*. 34(1):89-102. <https://doi.org/10.1007/s11105-015-0903-9>



CHÁVEZ-DÍAZ IF, Zelaya-Molina LX, Cruz-Cárdenas CI, Rojas-Anaya E, Ruíz-Ramírez S, de los Santos-Villalobos S. 2020. Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(6):1423-1436.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2492>

CONTRERAS-CORNEJO HA, Macías-Rodríguez L, Cortés-Penagos C, López-Bucio J. 2009. *Trichoderma virens*, a plant beneficial fungus, enhances biomass production and promotes lateral root growth through an auxin-dependent mechanism in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*. 149(3):1579-1592. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130369>

CONTRERAS-CORNEJO HA, Macías-Rodríguez L, Del-Val EK, Larsen J. 2016. Ecological functions of *Trichoderma* spp. and their secondary metabolites in the rhizosphere: interactions with plants. *FEMS Microbiology Ecology*. 92(4):fiw036. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw036>

CÓRDOVA-ALBORES LC, Zelaya-Molina LX, Ávila-Alistac N, Valenzuela-Ruíz V, Cortés-Martínez NE, Parra-Cota FI, Burgos-Canul YY, Chávez-Díaz IF, Fajardo-Franco ML. 2021. Omics sciences potential on bioprospecting of biological control agents: the case of Mexican agro-biotechnology. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 39(1):149-184. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2009-3>

COTLER H, Corona JA, Galeana-Pizaña JM. 2020. Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones Geográficas*. 101:e59976. <https://doi.org/10.14350/ig.59976>

COUTIÑO-PUCHULI AE, Peña-Borrego MD, Infante-Jiménez ZT. 2023. Estudio bibliométrico sobre biofertilizantes en México durante el período 2015-2020. *Terra Latinoamericana*. 41: e1449. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1449>

DE LA VEGA-CAMARILLO E, Hernández-García JA, Villa-Tanaca L, Hernández-Rodríguez C. 2023. Unlocking the hidden potential of Mexican teosinte seeds: revealing plant growth-promoting bacterial and fungal biocontrol agents. *Frontiers in Plant Science*. 14:1247814. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1247814>

DÍAZ-CARREÑO MÁ, del Moral-Barrera LE. 2026. Factores explicativos de la producción de granos en México, 2000-2022. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. 36(67):e261689. <https://doi.org/10.24836/es.v36i67.1689>

DÍAZ-FRANCO A, Ortiz-Cháirez FE, Lozano-Contreras MG, Aguado-Santacruz GA, Grageda-Cabrera OA. 2013. Growth, mineral absorption and yield of maize inoculated with microbe strains. *African Journal of Agricultural Research*. 8:3764-3769. <https://doi.org/10.5897/AJAR2012.6662>



ENEBE MC, Babalola OO. 2018. The influence of plant growth-promoting rhizobacteria in plant tolerance to abiotic stress: A survival strategy. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 102:7821-7835. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9214-z>

ERAZO N, Rosero G, Álvarez P. 2026. Uso de microorganismos en el manejo sostenible de los suelos. *Siembra*. 13(3):e9594.  
[https://doi.org/10.29166/siembra.v13i3\(Especial\).9594](https://doi.org/10.29166/siembra.v13i3(Especial).9594)

ESCÁRRAGA-TORRES LJ, Cuevas Sánchez JA, Baca-del Moral J, Ávalos-Vargas A. 2022. Análisis de los compromisos de México frente a la agrobiodiversidad en el sistema agroalimentario. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 23(1):e2174.  
[https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num1\\_art:2174](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num1_art:2174)

FAVILA-TELLO A. 2024. Análisis de los cultivos estratégicos básicos de México, a través del índice de autosuficiencia alimentaria, 2011-2020. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*. 13(35):33-51. <https://doi.org/10.31644/IMASD.35.2024.a03>

FÉLIX-GASTÉLUM R, Herrera-Rodríguez G, Ávila-Alistac N, León E. 2024. *Sclerotinia sclerotiorum* on bean and potato in Sinaloa: Etiology, epidemiology and alternatives for management. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 42(3):29.  
<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2404-6>

FÉLIX-GASTÉLUM R, Maldonado-Mendoza IE, Navarrete-Maya R, Olivas-Peraza NG, Brito-Vega H, Acosta-Gallegos JA. 2016. Identification of *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola* as the causal agent of halo blight in yellow beans in northern Sinaloa, Mexico. *Phytoparasitica*. 44(3):369-378. <https://doi.org/10.1007/s12600-016-0530-5>

FÉLIX-HERRÁN JA, Sañudo-Torres RR, Rojo-Martínez GE, Martínez-Ruiz R, Olalde-Portugal V. 2008. Importancia de los abonos orgánicos. *Ra Ximhai: revista científica de sociedad, cultura y desarrollo sostenible*. 4(1):57-68.  
<https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/187356>

FIGUEROA-LÓPEZ AM, Cordero-Ramírez JD, Martínez-Álvarez JC, López-Meyer M, Lizárraga-Sánchez GJ, Félix-Gastélum R, Castro-Martínez C, Maldonado-Mendoza IE. 2016. Rhizospheric bacteria of maize with potential for biocontrol of *Fusarium verticillioides*. *SpringerPlus*. 5(1):330. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1780-x>

GÓMEZ-OLIVER L. 2016. Evolución del empleo y de la productividad en el sector agropecuario en México. Santiago, Chile: Naciones Unidas. Pp. 60.  
<https://repositorio.cepal.org/entities/publication/3c1960b0-2b25-4f53-ad13-904852c25b5f>



GOVAERTS B, Verhulst N, Castellanos-Navarrete A, Sayre KD, Dixon J, Dendooven L. 2009. Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality. *Critical Reviews in Plant Science*. 28(3):97-122.

<https://doi.org/10.1080/07352680902776358>

GRYNDLER M, Larsen J, Hršelová H, Řezáčová V, Gryndlerová H., Kubát J. 2006. Organic and mineral fertilization, respectively, increase and decrease the development of external mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi in a long-term field experiment. *Mycorrhiza*. 16:159-166. <https://doi.org/10.1007/s00572-005-0027-4>

GUTIÉRREZ-CASTORENA EV, Gutiérrez-Castorena MC, Ortiz-Solorio CA. 2018. Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(1):201-215. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i1.750>

GUTIÉRREZ-MICELI FA, Santiago-Borraz J, Montes-Molina JA, Nafate CC, Abud-Archila M, Oliva-Llaven M.A., Rincón-Rosales R, Dendooven L. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Bioresource Technology*. 98(15):2781-2786.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.032>

HERNÁNDEZ-AGUILAR CG, Santiago-Martínez GM, Maldonado JR, Castañeda-Hidalgo E, Lozano-Trejo S, Jerez Salas M P. 2026. El cambio climático y su efecto en cultivos agrícolas de México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 9(6):10275-10293.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6.22157](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.22157)

HERNÁNDEZ-MELCHOR DJ, Ferrera-Cerrato R, Alarcón A. 2019. *Trichoderma*: importancia agrícola, biotecnológica, y sistemas de fermentación para producir biomasa y enzimas de interés industrial. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*. 35(1):98-112. <https://revistas.udec.cl/index.php/chjaas/article/view/993>

HU Z, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, Chen X, Zhou Y, Du G, Hu F, Jiang L, Hu S, Liu M. 2024. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships. *Nature Communications* 15:e2858. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47323-3>

IBÁÑEZ A, Garrido-Chamorro S, Vasco-Cárdenas MF, Barreiro C. 2023. From lab to field: biofertilizers in the 21st century. *Horticulturae* . 9(12):e1306.

<https://doi.org/10.3390/horticulturae9121306>

KHMELEVTSOVA LE, Sazykin IS, Azhogina TN, Sazykina MA. 2022. Influence of agricultural practices on bacterial community of cultivated soils. *Agriculture*. 12(3):371.

<https://doi.org/10.3390/agriculture12030371>



KUZHUPPILLYMYAL-PRABHAKARANKUTTY L, Martínez-Meléndez A, Cruz-López F. 2023. Los metabolitos secundarios como agentes antimicrobianos. *Biología y Sociedad*. 6(12):33-40. <https://doi.org/10.29105/bys6.12-94>

LEGRAND F, Picot A, Cobo-Díaz JF, Carof M, Chen W, Le Floch G. 2018. Effect of tillage and static abiotic soil properties on microbial diversity. *Applied Soil Ecology*. 132:135-145. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.016>

LÓPEZ-BUCIO J, Cruz-Ramírez A, Herrera-Estrella L. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology*. 6(3):280-287. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00035-9)

LÓPEZ-REYES L, Tapia-Hernández A, Jiménez-Salgado T, Espinosa-Victoria D, Carcaño Montiel M. 2014. Dr. José de Jesús Caballero Mellado líder de la microbiología de suelos en México. *Terra Latinoamericana*. 32(2):87-97. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/6>

MAIA-DE ANDRADE E, de Queiroz-Palácio HA, Neves-Dos Santos JC, Bandeira-Brasil J, Navarro-Hevia J. 2019. Procesos ecohidrológicos y servicios ecosistémicos en regiones secas. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. 45(1):241-250. <https://doi.org/10.31167/csecfv0i45.19510>

MARTÍNEZ-REYES L, Aguilar-Jiménez CE, Carcaño-Montiel MG, Galdámez-Galdámez J, Gutiérrez-Martínez A, Morales Cabrera JA, Gómez-Padilla E. 2018. Biofertilización y fertilización química en maíz (*Zea mays* L.) en Villaflores, Chiapas, México. *Siembra*. 5(1):26-37. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1425>

MARTÍNEZ-ROMERO E, Segovia L, Mercante FM, Franco AA, Graham P, Pardo MA. 1991. *Rhizobium tropici*, a novel species nodulating *Phaseolus vulgaris* L. beans and *Leucaena* sp. trees. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 41(3):417-426. <https://doi.org/10.1099/00207713-41-3-417>

MASTRETTA-YANES A, Bellon MR, Acevedo F, Burgeff C, Piñero D, Sarukhán J. 2019. Un programa para México de conservación y uso de la diversidad genética de las plantas domesticadas y sus parientes silvestres. *Revista fitotecnia mexicana*. 42(4):321-334. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/55>

MENA-VIOLANTE HG, Olalde-Portugal V. 2007. Alteration of tomato fruit quality by root inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): *Bacillus subtilis* BEB-13bs. *Scientia Horticulturae*. 113(1):103-106. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.01.031>



MITRA D, Mondal R, Khoshru B, Shadangi S, Mohapatra PKD, Panneerselvam P. 2021. Rhizobacteria mediated seed bio-priming triggers the resistance and plant growth for sustainable crop production. *Current Research in Microbial Sciences*. 2:e100071. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100071>

MOLINA-ZAPATA JE. 2021. La revolución verde como revolución tecnocientífica: artificialización de las prácticas agrícolas y sus implicaciones. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*. 21(42):175-204. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v21i42.3477>

MORALES-ARREDONDO I, Flores-Ocampo IZ, Armienta MA, Morán-Ramírez J, Hernández-Hernández MA, Landa-Arreguin JF. 2020. Identificación de las fuentes de nitratos mediante métodos hidrogeoquímicos e isotópicos en el agua subterránea del Bajío Guanajuatense. *Geofísica Internacional*. 59(3):169-194. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.3.2093>

MORENO-RESÉNDEZ A, Carda-Mendoza V, Reyes-Carrillo JL, Vásquez-Arroyo J, Cano-Ríos P. 2018. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*. 20(1):68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>

MORRONE JJ. 2019. Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 90: e902980. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2980>

NARAYANA S, Jagetiya P, Mathur R, Mishra R, Chauhan S. 2025. Biofertilizer Commercialization: Future prospects and challenges. *Agricultural Research Journal*. 62(1):1-15. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2025.00001.8>

NAVARRO-NOYA YE, Jan-Roblero J, González-Chávez MC, Hernández-Gama R, Hernández-Rodríguez C. 2010. Bacterial communities associated with the rhizosphere of pioneer plants (*Bahia xylopoda* and *Viguiera linearis*) growing on heavy metals-contaminated soils. *Antonie Van Leeuwenhoek*. 97(4):335-349. <https://doi.org/10.1007/s10482-010-9413-9>

OFORI KF, Antoniello S, English MM, Aryee AN. 2022. Improving nutrition through biofortification-a systematic review. *Frontiers in Nutrition*. 9:1043655, <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1043655>

ORDUZ-TOVAR SA, Machado-Cuéllar L, Rodríguez-Suárez L. 2021. Importancia de la biota edáfica para la productividad en agroecosistemas. *Revista Nova*. 6:27-38. <https://doi.org/10.23850/25004476.3681>



OREGEL-ZAMUDIO E, Angoa-Pérez MV, Oyoque-Salcedo G, Aguilar-González CN, Mena-Violante HG. 2017. Effect of candelilla wax edible coatings combined with biocontrol bacteria on strawberry quality during the shelf-life. *Scientia Horticulturae*. 214:273-279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.038>

PÉREZ-HERNÁNDEZ RA, Piñón-Castillo HA, García-Hernández DG, Ortiz-Martínez DM, González-Luna AR, Chávez-Montes A, Estrada-Platas KL, Gutiérrez-Soto JG. 2025. Uso agrícola de extractos vegetales nanoencapsulados en el control de fitopatógenos y poscosecha. *Revista Agro*. 3(1):1-32. <https://doi.org/10.47633/x2m2x827>

QUIÑONES AGUILAR EE, Hernández Cuevas LV, López Pérez L, Rincón Enríquez G. 2019. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi native from Agave rhizosphere as growth promoters in papaya. *Revista Terra Latinoamericana*. 37(2):163-174. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.397>

QUIÑONES-AGUILAR EE, López-Pérez L, Rincón-Enríquez G. 2014. Dinámica del crecimiento de papaya por efecto de la inoculación micorrízica y fertilización con fósforo. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 20(2):223-237. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.05.018>

RANGEL-MONTOYA EA, Delgado-Ramírez CS, Sepulveda E, Hernández-Martínez R. 2022. Biocontrol of *Macrophomina phaseolina* using *Bacillus amyloliquefaciens* strains in cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Agronomy*. 12(3):676. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030676>

RANGEL-MONTOYA EA, Paolinelli M, Rolshausen PE, Valenzuela-Solano C, Hernandez-Martinez R. 2021. Characterization of *Lasiodiplodia* species associated with grapevines in Mexico. *Phytopathologia Mediterranea*. 60(2):237-252. <https://doi.org/10.36253/phyto-12576>

REYES GE, Cortés JD. 2017. Intensidad en el uso de fertilizantes en América Latina y el Caribe (2006-2012). *Bioagro*. 29(1):45-52. <http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Cont29-1.htm>

RIBONI N, Bianchi F, Mattarozzi M, Caldara M, Gulli M, Graziano S, Maestri E, Marmioli N, Careri M. 2023. Ultra-high performance liquid chromatography-ion mobility-high-resolution mass spectrometry to evaluate the metabolomic response of durum wheat to sustainable treatments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 71(41):15407-15416. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04532>

RIVAS-GARCIA T, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Rincon-Enriquez G, Chiquito-Contreras RG, Hernandez-Montiel LG. 2019. Enhanced biocontrol of fruit rot on muskmelon by combination treatment with marine *Debaryomyces hansenii* and *Stenotrophomonas rhizophila* and their potential modes of action. *Postharvest Biology and Technology*. 151:61-67. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.013>



RODRIGUEZ-ESCUCHA WG, Manquillo-Hoyos CP, Ballesteros-Galindo LA. 2026. Estrategias de formulación de inoculantes microbianos como complemento para una agricultura más sostenible en el tiempo. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*. 14:118-149. <https://doi.org/10.53010/nys14.05>

RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ V, Díaz-Cervantes E. 2024. Potencial de los nanomateriales en la agricultura: retos y oportunidades. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*. 17(32):e1e-20e

<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69802>

ROSENBLUETH M, Martínez-Romero E. 2006. Bacterial endophytes and their interactions with hosts. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 19(8):827-837. <https://doi.org/10.1094/MPMI-19-0827>

SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). 2025. Acuerdo por el que se dan a conocer las reglas de operación del programa producción para el bienestar de la secretaría de agricultura y desarrollo Rural, para el ejercicio fiscal 2026. *Diario Oficial de la Federación*. Pp. 5-37. <https://sidof.segob.gob.mx/notas/5777639>

SALEEM M, Hu J, Jousset A. 2019. More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Reviews Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 50:145-168.

<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>

SÁNCHEZ TIGRERO S, Ramírez-Vargas D, García-Cruzatty L. 2025. El compostaje en agroecología: Efectos sobre la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y los microorganismos beneficiosos. *Scientia Agropecuaria*. 17(1):211-225.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2026.015>

SÁNCHEZ-GÓMEZ OA, Rubio-Aragón WA, Edeza-Urías JA, Espinoza-Aguirre LF, Romo-Valdez JM, Romo-Valdez AM, Romo-Rubio JA. 2025. Materia orgánica y actividad biológica del suelo. *Revista Contemporânea*. 5(10):e9346.

<https://doi.org/10.56083/RCV5N10-079>

SANTOYO G, Moreno-Hagelsieb G, Orozco-Mosqueda MC, Glick BR. 2016. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*. 183:92-99.

<https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>

SANTOYO G, Orozco-Mosqueda MDC, Govindappa M. 2012. Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: a review. *Biocontrol Science and Technology*. 22(8):855-872.

<https://doi.org/10.1080/09583157.2012.694413>



SARUKHÁN J, Koleff P, Carabias J, Soberón j, Dirzo R, Llorente-Bousquets J, Halffter G, González R, March I, Mohar A, Anta S, de la Maza J, Pisanty I, Urquiza-Haas T, Ruiz-González SP, García-Méndez G. 2017. Capital Natural de México. Síntesis. Evaluación del conocimiento y tendencias de cambio, perspectivas de sustentabilidad, capacidades humanas e institucionales. Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pp. 126.

<https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalnatmex.html>

SINGH B. 2018. Are nitrogen fertilizers deleterious to soil health? *Agronomy*. 8(4):48.

<https://doi.org/10.3390/agronomy8040048>

SOSA-BALDIVIA A, Ruiz-Ibarra G. 2017. La disponibilidad de alimentos en México: un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050. *Papeles de población*. 23(93):207-230. <https://doi.org/10.22185/24487147.2017.93.027>

TREJO D, Ferrera-Cerrato R, García R, Varela L, Lara L, Alarcón A. 2011. Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista Chilena de Historia Natural*. 84(1):23-31.

<https://rchn.biologiachile.cl/es/contents/2011v84n1/2.php>

URÍAS-RIVAS MO, Benitez-Diequez I, Bojórquez-López M. 2024. Efectos de las prácticas de agroquímicos en la salud humana y el medio ambiente en la agricultura sostenible. *Ra Ximhai*. 1(1):151-171. <https://doi.org/10.35197/rx.20.02.2024.07.mu>

VALENZUELA-RUIZ V, Gálvez-Gamboa GT, Villa Rodríguez ED, Parra Cota FI, Santoyo G, de los Santos-Villalobos S. 2020. Lipopéptidos producidos por agentes de control biológico del género *Bacillus*: revisión de herramientas analíticas utilizadas para su estudio. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(2):419-432.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.2191>

VARELA L, Trejo D. 2001. Los hongos micorrizógenos arbusculares como componentes de la biodiversidad del suelo en México. *Acta Zoologica Mexicana*. Número especial 1:39-51. <https://doi.org/10.21829/azm.2001.8401845>

VESSAL S, Salehi-Sardoei A, Fazeli-Nasab B, Shafi N, Shameem N, Parray JA. 2024. *Azospirillum*, a free-living nitrogen-fixing bacterium: smart agriculture and sustainable exploitation, in: Parray JA, *Progress in Soil Microbiome Research*. *Progress in Soil Science*. United kingdom: Springer Nature. Pp. 365-399. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16030-1.00001-8>



VILLA-RODRIGUEZ E, Parra-Cota F, Castro-Longoria E, López-Cervantes J, de los Santos-Villalobos S. 2019. *Bacillus subtilis* TE3: A promising biological control agent against *Bipolaris sorokiniana*, the causal agent of spot blotch in wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*). *Biological Control*. 132:135-143.

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.02.012>

VILLARREAL-DELGADO MF, Villa-Rodríguez ED, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, de los Santos-Villalobos S. 2018. The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Revista Mexicana de Fitopatología*. 36(1):95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>

WANG X, Xie H, Wang P, Yin H. 2023 Nanoparticles in plants: uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials*. 16(8):3097.

<https://doi.org/10.3390/ma16083097>