PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y AMBIENTALES

CARRERA DE MICROBIOLOGÍA

El papel de *Bacillus* spp. en la sanidad vegetal: biocontrol de fitopatógenos y promoción del crecimiento de cultivos

Monografía previa a la obtención del título de Licenciada en Microbiología

María Dolores Montero Echeverría

Quito, 2026

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Monografía de la carrera de Microbiología, de la Srta. María Dolores Montero Echeverría ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.





Firma del tutor de la monografía

Ing. Agr. Jeniffer Yanez A. Mtr.

Quito, 09 de 06 de 2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Erika Echeverría y Francisco Montero, por su apoyo incondicional, esfuerzo y amor durante toda mi formación académica. Gracias por acompañarme en cada etapa, por sus consejos, por motivarme en los momentos difíciles y por confiar siempre en mí incluso cuando yo misma sentía que no podía continuar. Todo lo que he logrado también es gracias a ustedes.

A mis tíos, Anita Montero y Marcelo Ortega, por haber estado siempre presentes a lo largo de este camino. Gracias por su cariño, apoyo y preocupación constante, especialmente durante el tiempo que he vivido lejos de casa. Su ayuda, compañía y todo lo que han hecho por mí han sido fundamentales para poder continuar y alcanzar esta meta.

Y de manera especial, a mi perrito Max, por haber sido mi compañía y mi felicidad en los momentos de estrés y cansancio. Gracias por alegrar mis días y convertirse en un pequeño refugio durante este largo proceso académico.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN 1
2. ABSTRACT 2
3. INTRODUCCIÓN 3
4. OBJETIVOS 7
4.1 OBJETIVO GENERAL 7
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 7
5. MARCO TEÓRICO 8
1. SANIDAD VEGETAL Y AGRICULTURA SOSTENIBLE 8
2. MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN LA AGRICULTURA 9
3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL GÉNERO *BACILLUS* 11
4. MECANISMOS DE BIOCONTROL DE *BACILLUS* SPP. 15
5. *BACILLUS* SPP. COMO PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR) 21
6. APLICACIONES AGRONÓMICAS DE *BACILLUS* SPP. 29
6.1 BENEFICIOS Y APLICACIONES AGRONÓMICAS DE *BACILLUS* SPP. 29
6.2 FACTORES AMBIENTALES, EDÁFICOS Y BIOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA DE *BACILLUS* SPP. EN CAMPO 32
6.3 LIMITACIONES Y DESAFÍOS EN LA APLICACIÓN AGRÍCOLA DE *BACILLUS* SPP. 33
7. PERSPECTIVAS BIOTECNOLÓGICAS DE *BACILLUS* SPP. 35
6. CONCLUSIONES 38
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41

DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la elaboración de esta monografía se utilizó inteligencia artificial como herramienta de apoyo únicamente en algunas partes del marco teórico donde se presentaron dificultades de redacción. Su uso se centró en mejorar la estructura de ciertas oraciones, organizar mejor las ideas, favorecer la coherencia entre párrafos y redactar de forma más clara la información obtenida a partir de artículos científicos previamente revisados. La inteligencia artificial no fue utilizada en toda la monografía ni para generar contenido científico original. Tampoco se empleó para generar datos, resultados, análisis, conclusiones ni referencias bibliográficas. Toda la información científica incluida en este trabajo fue obtenida de artículos, revisiones y documentos académicos citados en las referencias correspondientes. La selección de la información, su revisión, interpretación y la versión final del contenido fueron realizadas por la autora.

1. RESUMEN

El presente trabajo analiza el papel del género *Bacillus* spp. en la sanidad vegetal, destacando su función como agente de biocontrol de fitopatógenos y como promotor del crecimiento de cultivos en sistemas agrícolas sostenibles. En el contexto actual, la dependencia de agroquímicos ha generado impactos ambientales negativos, resistencia en patógenos y afectaciones a la salud del suelo, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas biológicas basadas en microorganismos beneficiosos. El objetivo general de esta monografía fue analizar el papel de *Bacillus* spp. en la sanidad vegetal mediante la revisión de sus mecanismos de biocontrol y promoción del crecimiento vegetal. Para ello, se desarrolló una revisión bibliográfica sobre sus características generales, mecanismos de acción, funciones como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y aplicaciones agronómicas. Los resultados evidencian que *Bacillus* spp. ejerce su efecto mediante múltiples mecanismos, incluyendo la producción de lipopéptidos antimicrobianos, enzimas hidrolíticas, sideróforos, compuestos volátiles y fitohormonas, además de la inducción de resistencia sistémica en las plantas. Asimismo, su capacidad de solubilización de nutrientes y estimulación del sistema radicular contribuye significativamente al crecimiento vegetal y a la tolerancia frente a estrés biótico y abiótico. Sin embargo, se identificó que su eficacia en campo puede variar dependiendo de factores ambientales, edáficos, biológicos y de la cepa utilizada, lo que limita su aplicación uniforme en sistemas agrícolas. Se concluye que *Bacillus* spp. representa una herramienta biotecnológica clave para la agricultura sostenible, al integrar funciones de biocontrol y promoción del crecimiento vegetal. No obstante, su desempeño depende de condiciones específicas del entorno, por lo que su uso debe ser optimizado mediante selección de cepas adecuadas y estrategias de aplicación adaptadas a cada sistema agrícola.

Palabras clave: *Bacillus* spp., biocontrol, fitopatógenos, PGPR, sanidad vegetal.

2. ABSTRACT

This study analyzes the role of the *Bacillus* spp. genus in plant health, highlighting its function as a biocontrol agent against phytopathogens and as a plant growth promoter in sustainable agricultural systems. In the current context, the heavy reliance on agrochemicals has generated negative environmental impacts, pathogen resistance, and soil health deterioration, leading to the search for biological alternatives based on beneficial microorganisms. The main objective of this monograph was to analyze the role of *Bacillus* spp. in plant health through a review of its biocontrol mechanisms and plant growth-promoting activities. A literature review was conducted covering its general characteristics, mechanisms of action, functions as plant growth-promoting rhizobacteria, and agronomic applications. The findings show that *Bacillus* spp. exerts its effects through multiple mechanisms, including the production of antimicrobial lipopeptides, hydrolytic enzymes, siderophores, volatile organic compounds, and phytohormones, as well as the induction of systemic resistance in plants. In addition, its ability to solubilize nutrients and stimulate root development significantly enhances plant growth and increases tolerance to both biotic and abiotic stresses. However, its field performance varies depending on environmental, edaphic, biological factors and strain-specific characteristics, which limits its uniform application in agricultural systems. It is concluded that *Bacillus* spp. represents a key biotechnological tool for sustainable agriculture by integrating biocontrol and plant growth promotion functions. Nevertheless, its effectiveness depends on specific environmental conditions, and therefore its application must be optimized through proper strain selection and tailored agricultural strategies.

Keywords: *Bacillus* spp., biocontrol, phytopathogens, plant growth promotion, plant health.

3. INTRODUCCIÓN

La sanidad vegetal es un componente esencial de la productividad agrícola, especialmente en países donde la agricultura constituye un eje socioeconómico clave. El manejo de plagas y enfermedades continúa representando uno de los mayores desafíos para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, debido a que las pérdidas ocasionadas por patógenos pueden comprometer de manera significativa el rendimiento de los cultivos (FAO, 2021). Durante décadas, la agricultura convencional ha dependido fuertemente del uso de pesticidas químicos para enfrentar estos problemas; sin embargo, su aplicación intensiva ha generado preocupación en torno a la contaminación ambiental, el impacto sobre la salud humana, la afectación a organismos no objetivo y el desarrollo de resistencia en patógenos (Popp, Pető y Nagy, 2013).

Frente a este panorama, la agroecología y la agricultura orgánica han impulsado el uso de estrategias microbiológicas como alternativas sostenibles, promoviendo el empleo de microorganismos como controladores biológicos de fitopatógenos y como biofertilizantes. Dentro de estos microorganismos se incluyen hongos y bacterias con funciones clave en la sanidad vegetal y la productividad agrícola. En este contexto, distintas especies del género *Bacillus* han adquirido gran relevancia por su capacidad para actuar como agentes de biocontrol y como microorganismos promotores del crecimiento vegetal, conocidos en inglés como Plant Growth- Promoting Rhizobacteria (PGPR) (Miljaković et al., 2020).

Los estudios recientes destacan que *Bacillus* spp. es un género bacteriano compuesto por bacterias Gram positivas, formadoras de esporas, aerobias o facultativamente anaerobias, ampliamente distribuidas en suelos agrícolas y ambientes asociados a la rizósfera. Estas características generales le confieren una alta capacidad de adaptación y supervivencia en condiciones ambientales variables. Entre sus cualidades funcionales más relevantes se incluye la producción de metabolitos antimicrobianos, enzimas hidrolíticas, compuestos volátiles orgánicos, sideróforos, fitohormonas y lipopéptidos con actividad biológica (Villarreal et al., 2017; Shafi, Tian y Ji, 2017). Estas moléculas

permiten inhibir a diversos fitopatógenos, mejorar la disponibilidad de nutrientes y estimular respuestas de defensa en las plantas. Asimismo, la formación de esporas, rasgo distintivo del género, permite a estas bacterias sobrevivir en condiciones ambientales adversas, colonizar de manera eficiente la rizósfera y mantener actividad biológica prolongada, incluso en ambientes donde otras bacterias benéficas no podrían prosperar (Miljaković, Marinković y Balešević, 2020; Cawoy et al., 2011). Estudios más recientes han ampliado la comprensión de estos mecanismos, incorporando enfoques de bioingeniería y análisis ómicos que permiten entender con mayor precisión la interacción de *Bacillus spp.* con las plantas y el suelo (Gayithri et al., 2026).

Diversas investigaciones confirman el potencial agronómico de *Bacillus* spp. en cultivos de interés económico, donde se ha observado su capacidad para mejorar el crecimiento vegetal, incrementar la tolerancia al estrés abiótico y reducir la incidencia de enfermedades causadas por hongos, bacterias y oomycetes (Miljaković et al., 2020; Ramírez-Pool et al., 2024; Weinand, Hasan y Asch, 2023). Estas propiedades han permitido que varias cepas formen parte de biopesticidas y biofertilizantes utilizados a nivel mundial, tales como formulaciones basadas en *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens* y *Bacillus pumilus*, ampliamente empleadas en el manejo integrado de enfermedades y en la promoción del crecimiento vegetal (Cawoy et al., 2011; Shafi, Tian y Ji, 2017). Asimismo, se ha demostrado que la aplicación de cepas específicas puede mejorar la productividad agrícola incluso bajo esquemas de fertilización reducida, contribuyendo a sistemas más sostenibles (Altimira et al., 2024).

No obstante, el desempeño de *Bacillus* spp. no es uniforme y puede presentar variabilidad significativa dependiendo de la cepa utilizada, del tipo de cultivo, de las condiciones edáficas, del clima y de la interacción con la microbiota nativa del suelo. Aunque muchas investigaciones reportan claros beneficios, otras describen efectos limitados o incluso inconsistentes (Miljaković, Marinković y Balešević, 2020). Este es uno de los puntos centrales que motivan el desarrollo de la presente monografía: comprender el papel dual de *Bacillus* spp., es decir, los escenarios donde se comporta como un microorganismo altamente beneficioso y aquellos en los que su actividad es

mínima o no logra generar los resultados esperados. A pesar de estos avances, estudios recientes señalan que la respuesta de *Bacillus spp.* puede ser altamente variable debido a factores ambientales, genéticos y ecológicos, lo que limita su aplicación generalizada en campo (Tariq et al., 2025). En este contexto, persiste una brecha en el conocimiento sobre las condiciones específicas que determinan su eficacia, lo que dificulta su aplicación estandarizada en sistemas agrícolas.

Por ejemplo, Tsotetsi et al. (2022) muestran que algunas cepas incrementan la resistencia al estrés y el crecimiento vegetal en determinadas condiciones, pero no presentan los mismos efectos en suelos con microbiota establecida y competencia microbiana intensa. De manera similar, Li, Zang y Zhao (2022) observan que, la combinación de cepas de *Bacillus* tiene buen desempeño bajo estrés salino, pero sus efectos se diluyen cuando los parámetros ambientales varían. Estas observaciones evidencian que su eficacia depende de múltiples factores interrelacionados, y que su comportamiento no puede generalizarse sin considerar el contexto ecológico en el que actúa. En este sentido, el estudio actualizado de *Bacillus spp.* resulta fundamental para optimizar su aplicación en la agricultura moderna, considerando los avances recientes en biotecnología y sostenibilidad agrícola (Gayithri et al., 2026; Sales y Rigobelo, 2024).

Por otro lado, *Bacillus* también puede desempeñar un papel relevante en la respuesta de las plantas frente a patógenos, ya sea mediante mecanismos directos como la secreción de antibióticos, o indirectos como la inducción de resistencia sistémica. Shafi, Tian y Ji (2017) señalan que especies como *Bacillus subtilis, B. amyloliquefaciens* y *B. pumilus* producen compuestos como surfactina, iturina y fengicina, ampliamente documentados por su capacidad para inhibir fitopatógenos. Dobrzyński et al. (2023), por su parte, demostraron que *B. pumilus* tiene la capacidad de suprimir hongos patógenos mediante la síntesis de compuestos antifúngicos y enzimas líticas que degradan componentes de la pared celular de los microbios atacados.

Pese a los múltiples beneficios descritos, se ha observado que la interacción de *Bacillus* spp. con la microbiota del suelo o con otros factores de manejo agrícola puede alterar sus efectos. Miljaković, Marinković y Balešević (2020) explican que la competencia por nutrientes, la presencia

de microbios antagonistas o la composición fisicoquímica del suelo influyen directamente en su desempeño. Asimismo, Zhao y Wang (2021) muestran que, la capacidad de inducir resistencia sistémica puede variar entre cultivos, por lo que no todas las plantas responden de manera semejante. En consecuencia, surge la necesidad de evaluar críticamente esta dualidad para determinar en qué condiciones las bacterias del género *Bacillus* spp. representan una herramienta eficaz para el biocontrol y la promoción del crecimiento vegetal, y cuándo sus efectos pueden verse limitados. Esta revisión pretende aportar una visión integral sobre el papel de este género bacteriano, integrando resultados de investigaciones recientes y analizando los aspectos que explican su variabilidad en campo.

La importancia de estudiar este microorganismo ha sido destacada a nivel mundial debido a su potencial para contribuir a sistemas agrícolas más sostenibles, mediante la reducción del uso de agroquímicos, la preservación de la calidad del suelo y el fortalecimiento de estrategias de manejo integrado de plagas y enfermedades. En este contexto, diversas investigaciones internacionales han señalado a *Bacillus* spp. como un candidato relevante para su aplicación en la sanidad vegetal, tanto en el biocontrol de fitopatógenos como en la promoción del crecimiento de los cultivos. Esta relevancia global se refleja también en el contexto agrícola ecuatoriano, donde la producción de cultivos como papa, banano, cacao, café y hortalizas constituye un pilar fundamental de la economía y se ve constantemente afectada por una amplia diversidad de plagas y enfermedades. En este sentido, la incorporación de *Bacillus* spp. en estrategias de manejo integrado representa una alternativa prometedora para avanzar hacia una agricultura sostenible en el país. Bajo esta perspectiva, el presente estudio no solo busca recopilar información existente, sino también aportar una síntesis crítica que permita identificar los factores que condicionan la eficacia de *Bacillus* spp.*,* contribuyendo al desarrollo de estrategias más eficientes en la sanidad vegetal.

El análisis de esta información permitirá comprender el potencial de *Bacillus* spp. como herramienta biotecnológica en la agricultura sostenible, así como reconocer los factores que influyen en su eficacia y las limitaciones asociadas a su aplicación.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el papel de *Bacillus* spp. en la sanidad vegetal, mediante la revisión de su función como agente de biocontrol de fitopatógenos y promotor del crecimiento de cultivos.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los principales mecanismos mediante los cuales *Bacillus* spp. ejerce el biocontrol de fitopatógenos y promueve el crecimiento vegetal.

- Identificar los factores ambientales, edáficos y biológicos que influyen en la eficacia de *Bacillus* spp. en diferentes cultivos.

- Analizar los beneficios y las limitaciones reportadas en distintos estudios para comprender la variabilidad de su desempeño en la sanidad vegetal.

5. MARCO TEÓRICO

1. SANIDAD VEGETAL Y AGRICULTURA SOSTENIBLE

La sanidad vegetal constituye un pilar fundamental para garantizar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria a nivel mundial. Las enfermedades causadas por fitopatógenos pueden generar pérdidas significativas en los cultivos, afectando tanto el rendimiento como la calidad de la producción agrícola. En este sentido, organismos internacionales como la FAO (2021) destacan que la protección de los cultivos es esencial para sostener sistemas alimentarios eficientes y resilientes.

Durante décadas, el manejo de enfermedades en los sistemas agrícolas ha estado basado principalmente en el uso de agroquímicos, tales como pesticidas y fungicidas. Si bien estas estrategias han permitido controlar diversos patógenos, su uso intensivo ha generado múltiples problemáticas, incluyendo la contaminación del suelo y del agua, efectos negativos sobre la biodiversidad, riesgos para la salud humana y el desarrollo de resistencia en los microorganismos patógenos (Popp, Pető y Nagy, 2013; Sales y Rigobelo, 2024). Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y amigables con el ambiente.

En este contexto, la agricultura sostenible surge como un enfoque que busca equilibrar la producción agrícola con la conservación de los recursos naturales, promoviendo prácticas que reduzcan el impacto ambiental sin comprometer la productividad. Dentro de este enfoque, la agroecología y la agricultura orgánica han cobrado relevancia al fomentar el uso de procesos biológicos y ecológicos en el manejo de los cultivos.

Una de las estrategias más prometedoras dentro de estos sistemas es el uso de microorganismos benéficos como herramientas para la sanidad vegetal. Diversos estudios recientes han demostrado que ciertas bacterias y hongos pueden desempeñar un papel clave en la protección de las plantas y en la mejora de su crecimiento, actuando como agentes de biocontrol y biofertilizantes

(Etesami et al., 2023). Estos microorganismos contribuyen a la supresión de patógenos, a la mejora de la disponibilidad de nutrientes y al fortalecimiento de los mecanismos de defensa de las plantas.

Asimismo, investigaciones actuales destacan que la incorporación de microorganismos en los sistemas agrícolas puede reducir significativamente la dependencia de insumos químicos, favoreciendo prácticas más sostenibles y eficientes (Sales y Rigobelo, 2024). Desde una perspectiva más amplia, los avances en biotecnología y estudios recientes han permitido comprender mejor el papel multifuncional de estos organismos en la agricultura moderna, posicionándolos como componentes clave en el desarrollo de sistemas productivos resilientes (Gayithri et al., 2026).

En consecuencia, la integración de estrategias basadas en microorganismos representa una alternativa viable para mejorar la sanidad vegetal y avanzar hacia modelos agrícolas más sostenibles, donde se priorice el equilibrio entre productividad, salud ambiental y sostenibilidad a largo plazo.

2. MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN LA AGRICULTURA

Los microorganismos del suelo constituyen un componente esencial de los ecosistemas agrícolas, ya que participan activamente en procesos clave como la descomposición de la materia orgánica, el reciclaje de nutrientes y el mantenimiento de la fertilidad del suelo. En particular, la rizósfera zona del suelo influenciada por las raíces de las plantas es un ambiente altamente dinámico donde ocurren interacciones complejas entre microorganismos y plantas, influyendo directamente en la salud y productividad de los cultivos (Etesami et al., 2023; Sales y Rigobelo, 2024).

Dentro de este entorno, diversos microorganismos han sido reconocidos por sus efectos benéficos en la agricultura, incluyendo bacterias y hongos que contribuyen tanto a la protección de las plantas como a la mejora de su crecimiento. Estos organismos actúan mediante mecanismos como la supresión de fitopatógenos, la competencia por recursos, la producción de metabolitos bioactivos

y la mejora en la disponibilidad de nutrientes, lo que los convierte en herramientas clave para el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles (Gayithri et al., 2026; Tsotetsi et al., 2022).

Entre los microorganismos benéficos, los hongos desempeñan un papel importante en la sanidad vegetal. Géneros como *Trichoderma* han sido ampliamente estudiados por su capacidad de actuar como agentes de biocontrol, inhibiendo el crecimiento de patógenos mediante la producción de compuestos antimicrobianos, enzimas hidrolíticas y competencia por espacio y nutrientes. Además, otros hongos como *Glomus* y *Rhizophagus* (hongos micorrízicos arbusculares) establecen asociaciones simbióticas con las raíces de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes esenciales como el fósforo y mejorando el desarrollo vegetal (Etesami et al., 2023).

De manera complementaria, diversas bacterias del suelo como *Pseudomonas*, *Azospirillum* y especies del género *Bacillus* también cumplen funciones clave en la sanidad vegetal, ya sea mediante la producción de metabolitos antimicrobianos, la solubilización de nutrientes o la inducción de resistencia en las plantas (Miljaković et al., 2020; Ramírez et al., 2024). Asimismo, aunque en menor medida, algunos virus como los bacteriófagos han sido estudiados como herramientas potenciales para el control de fitopatógenos bacterianos, contribuyendo a estrategias alternativas de manejo biológico.

Por otro lado, las bacterias benéficas del suelo, especialmente aquellas asociadas a la rizósfera, cumplen funciones fundamentales en la promoción del crecimiento vegetal. Estas bacterias incluyen un grupo conocido como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las cuales pueden estimular el desarrollo de las plantas mediante la producción de fitohormonas, la solubilización de nutrientes y la fijación biológica de nitrógeno. Además, algunas PGPR son capaces de inducir resistencia sistémica en las plantas, fortaleciendo sus mecanismos de defensa frente a patógenos (Gayithri et al., 2026; Miljaković et al., 2020).

Dentro de las bacterias benéficas, diversas especies del género *Bacillus*, entre ellas *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus safensis* y *Bacillus siamensis*, han adquirido especial relevancia debido a su amplia distribución en suelos agrícolas y su capacidad para sobrevivir en condiciones adversas mediante la formación de endosporas. Estas bacterias no solo actúan como PGPR, sino que también presentan un importante potencial como agentes de biocontrol gracias a la producción de metabolitos antimicrobianos, enzimas y compuestos bioactivos que inhiben el desarrollo de fitopatógenos (Shafi et al., 2017; Miljaković et al., 2020). Por esta razón, *Bacillus* spp. se ha posicionado como uno de los grupos microbianos más estudiados en la agricultura sostenible.

Las interacciones planta microorganismo son altamente complejas y dependen de múltiples factores, incluyendo las condiciones ambientales, el tipo de cultivo y la composición de la microbiota del suelo. En muchos casos, estas interacciones resultan en relaciones mutualistas, donde las plantas proporcionan compuestos orgánicos a través de exudados radiculares, mientras que los microorganismos contribuyen a mejorar la nutrición y la defensa vegetal. Estas relaciones son fundamentales para el funcionamiento de los agroecosistemas y para el aprovechamiento de microorganismos benéficos en la agricultura (Tsotetsi et al., 2022).

En este contexto, el estudio de los microorganismos benéficos, y en particular de las PGPR como *Bacillus* spp., resulta clave para comprender su potencial en la mejora de la sanidad vegetal y la productividad agrícola. La integración de estos microorganismos en los sistemas productivos representa una alternativa sostenible frente al uso intensivo de agroquímicos, permitiendo avanzar hacia modelos agrícolas más eficientes, resilientes y respetuosos con el medio ambiente (Sales y Rigobelo, 2024; Gayithri et al., 2026)

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL GÉNERO *BACILLUS*

El género *Bacillus* pertenece al dominio Bacteria y al filo Firmicutes, e incluye un amplio grupo de bacterias Gram positivas caracterizadas principalmente por su capacidad de formar endosporas.

Estas bacterias pueden ser aerobias estrictas o facultativamente anaerobias, lo que les permite desarrollarse en una amplia variedad de condiciones ambientales. Su capacidad de esporulación constituye una de sus principales ventajas biológicas, ya que les permite resistir condiciones adversas como altas temperaturas, desecación, radiación y limitación de nutrientes, asegurando su persistencia en el suelo y otros ambientes naturales (Villarreal-Delgado et al., 2017; Abuhena, 2024). Esta resistencia favorece su supervivencia a largo plazo y su uso en aplicaciones agrícolas.

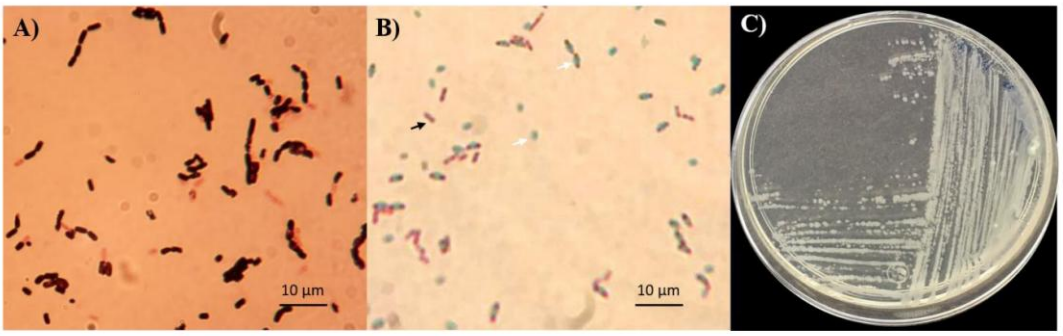


Figura 1. Características morfológicas del género *Bacillus*. (A) Células bacilares Gram positivas observadas al microscopio. (B) Formación de endosporas bacterianas como mecanismo de resistencia y supervivencia. (C) Morfología macroscópica de colonias de *Bacillus* spp. en medio de cultivo *(Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017).*

Desde el punto de vista morfológico y fisiológico, las especies del género *Bacillus* presentan forma bacilar y una notable diversidad metabólica, lo que les permite adaptarse a diferentes nichos ecológicos. Como se observa en la Figura 1, estas características incluyen la morfología bacilar, la formación de endosporas y el aspecto macroscópico de sus colonias. Estas bacterias son capaces de sintetizar una amplia gama de compuestos bioactivos, incluyendo metabolitos secundarios, antibióticos, enzimas extracelulares y compuestos volátiles, que desempeñan un papel fundamental en sus interacciones con otros microorganismos y con las plantas. Esta versatilidad metabólica no solo les permite competir en ambientes complejos como la rizósfera, sino también influir directamente en

la sanidad vegetal mediante la inhibición de patógenos y la promoción del crecimiento de las plantas (Shafi et al., 2017; Sarangi y Ramakrishnan, 2023).

Una de las características más relevantes de *Bacillus spp.* es la formación de endosporas, estructuras altamente diferenciadas que se generan en respuesta a condiciones de estrés. Estas esporas presentan una gran resistencia a factores físicos y químicos, lo que permite a las bacterias sobrevivir durante largos periodos en condiciones desfavorables. Esta propiedad es particularmente importante en el ámbito agrícola, ya que facilita la formulación, almacenamiento y aplicación de productos comerciales basados en *Bacillus*, como biofertilizantes y biopesticidas, garantizando su viabilidad y eficacia en campo (Cawoy et al., 2011; Miljaković et al., 2020).

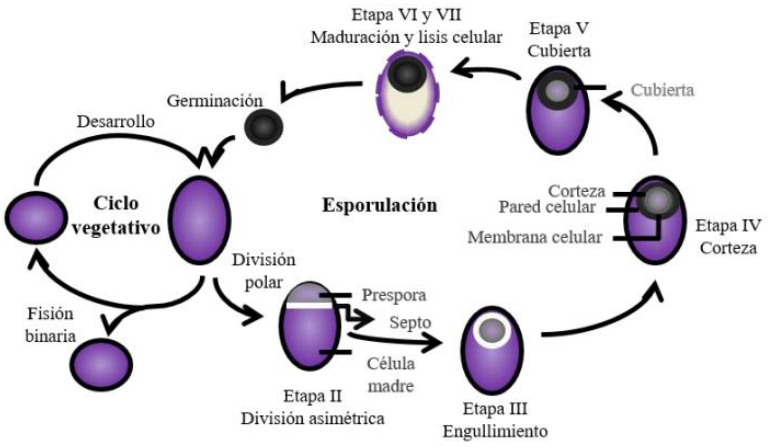


Figura 2. Ciclo de esporulación del género *Bacillus*, mostrando las etapas de formación y liberación de endosporas desde la fase vegetativa hasta la maduración celular. La figura representa el proceso de división asimétrica, formación de la prespora, engullimiento por la célula madre, síntesis de la corteza y cubierta protectora, así como la liberación final de la endospora madura, estructura altamente resistente frente a condiciones ambientales adversas. *(Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017, basado en Errington, 2003).*

El proceso de esporulación en *Bacillus spp.* constituye un mecanismo de supervivencia altamente especializado que se activa frente a condiciones ambientales desfavorables, como limitación de nutrientes o estrés físico. Durante este proceso ocurren múltiples cambios estructurales y fisiológicos

que permiten la formación de una endospora altamente resistente. Inicialmente, la bacteria se encuentra en fase vegetativa y se reproduce mediante fisión binaria; posteriormente, ocurre una división asimétrica o polar que origina una célula madre y una prespora. Después se produce el engullimiento de la prespora por parte de la célula madre y la formación progresiva de estructuras protectoras como la corteza y la cubierta esporal, las cuales proporcionan resistencia frente a calor, desecación y agentes químicos. Finalmente, la espora madura es liberada al ambiente mediante la lisis de la célula madre, permitiendo la persistencia de *Bacillus* spp. durante largos periodos en condiciones adversas (Villarreal-Delgado et al., 2017).

En cuanto a su distribución ecológica, las especies del género *Bacillus* se encuentran ampliamente presentes en suelos agrícolas, especialmente en la rizósfera, donde interactúan directamente con las raíces de las plantas. En este microambiente, estas bacterias pueden colonizar eficazmente las superficies radiculares y establecer relaciones beneficiosas con las plantas, contribuyendo a la mejora de la disponibilidad de nutrientes, la protección frente a patógenos y la estimulación del crecimiento vegetal. Esta capacidad de colonización es clave para su éxito como microorganismos promotores del crecimiento vegetal (Ramírez-Pool et al., 2024; Weinand et al., 2023).

Finalmente, las ventajas ecológicas de *Bacillus spp.* radican en su alta adaptabilidad, su capacidad de colonización y su habilidad para producir compuestos bioactivos que les permiten competir eficazmente con otros microorganismos del suelo. Estas características, junto con su resistencia ambiental y su potencial biotecnológico, han posicionado a este género como uno de los más importantes en el desarrollo de estrategias sostenibles en la agricultura. Estudios recientes destacan además el uso de herramientas biotecnológicas y enfoques ómicos para optimizar su aplicación en campo, lo que refuerza su relevancia en la agricultura moderna (Galkin y Ruzhanskyi, 2024; Gayithri et al., 2026).

4. MECANISMOS DE BIOCONTROL DE *BACILLUS* SPP.

Las especies del género *Bacillus* ejercen su acción de biocontrol mediante diversos mecanismos directos e indirectos que les permiten inhibir el desarrollo de fitopatógenos y favorecer la sanidad vegetal. Estos mecanismos incluyen la producción de metabolitos antimicrobianos, la secreción de enzimas hidrolíticas, la competencia por nutrientes y espacio en la rizósfera, así como la inducción de respuestas de defensa en las plantas. La combinación de estos procesos convierte a *Bacillus* spp. en uno de los grupos bacterianos más utilizados en estrategias de control biológico y agricultura sostenible (Shafi et al., 2017; Sarangi y Ramakrishnan, 2023). Además, la capacidad multifuncional de estas bacterias les permite actuar simultáneamente sobre diferentes etapas del desarrollo de los fitopatógenos, aumentando la eficacia del control biológico y favoreciendo la estabilidad microbiológica del suelo agrícola. Diversos estudios reportan que la interacción entre varios mecanismos de acción genera efectos sinérgicos que incrementan la protección vegetal frente a enfermedades causadas por hongos, bacterias y oomicetos (Cawoy et al., 2011; Gayithri et al., 2026).

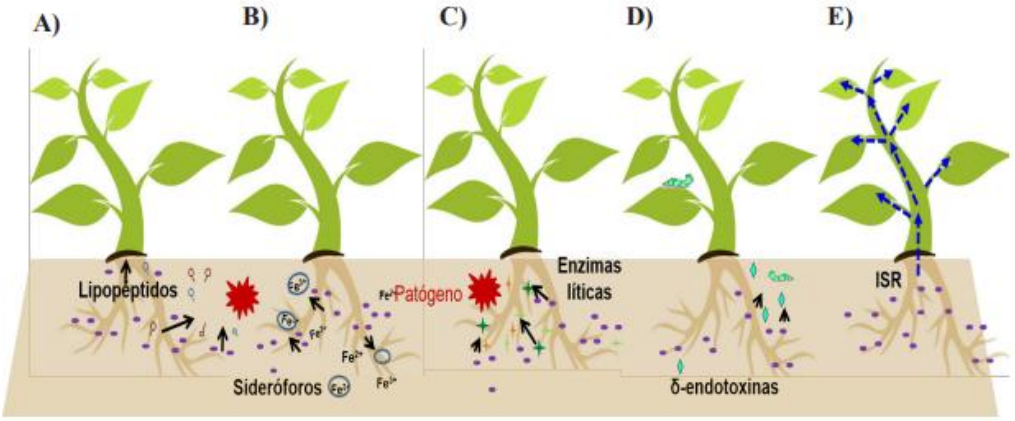


Figura 3. Principales mecanismos de control biológico ejercidos por *Bacillus* spp. en la rizósfera. La imagen representa diferentes mecanismos directos e indirectos utilizados por especies del género *Bacillus* para inhibir el desarrollo de fitopatógenos y favorecer la sanidad vegetal. A) Entre ellos se incluyen la producción de lipopéptidos antimicrobianos, B) sideróforos para captura de hierro, C) enzimas líticas capaces de degradar paredes celulares fúngicas, D) δ-endotoxinas y E) la inducción de resistencia sistémica en las plantas. Estos mecanismos permiten reducir el crecimiento de microorganismos patógenos y fortalecer las respuestas defensivas vegetales. (Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017).

Uno de los mecanismos más importantes y estudiados es la producción de lipopéptidos cíclicos, especialmente surfactina, iturina y fengicina. Estos compuestos son metabolitos secundarios sintetizados por vías no ribosomales y poseen propiedades antimicrobianas altamente efectivas frente a diversos hongos y bacterias fitopatógenas. La surfactina se caracteriza por su actividad biosurfactante, la cual le permite alterar la tensión superficial y desestabilizar las membranas celulares de los microorganismos. Además, participa en la formación de biofilms y en procesos de colonización de raíces, favoreciendo la persistencia de *Bacillus* en la rizósfera (Shafi et al., 2017). La formación de biofilms representa una ventaja ecológica importante, ya que facilita la adherencia bacteriana a las superficies radiculares y protege a las bacterias frente a cambios ambientales adversos. Asimismo, la surfactina interviene en mecanismos de comunicación celular y motilidad bacteriana, favoreciendo la expansión y establecimiento de las poblaciones microbianas benéficas sobre las raíces de las plantas (Miljaković et al., 2020).

Por otro lado, la iturina presenta una potente actividad antifúngica debido a su capacidad de interactuar directamente con los lípidos de la membrana celular de los hongos. Esta interacción genera poros y altera la permeabilidad de la membrana, provocando pérdida del contenido celular y muerte del patógeno. De manera similar, la fengicina actúa principalmente contra hongos filamentosos, afectando la integridad de la membrana plasmática e inhibiendo el crecimiento micelial. La acción combinada de estos lipopéptidos incrementa significativamente la eficacia de *Bacillus* spp. como agente de biocontrol en diferentes cultivos agrícolas (Dobrzyński et al., 2023; Sarangi y Ramakrishnan, 2023). Adicionalmente, algunos estudios indican que estos compuestos pueden inducir estrés oxidativo en las células fúngicas mediante alteraciones metabólicas y daño estructural progresivo. La producción simultánea de surfactina, fengicina e iturina permite ampliar el espectro de acción antimicrobiana y reducir la probabilidad de adaptación de los fitopatógenos frente a un único compuesto inhibitorio (Cawoy et al., 2011).

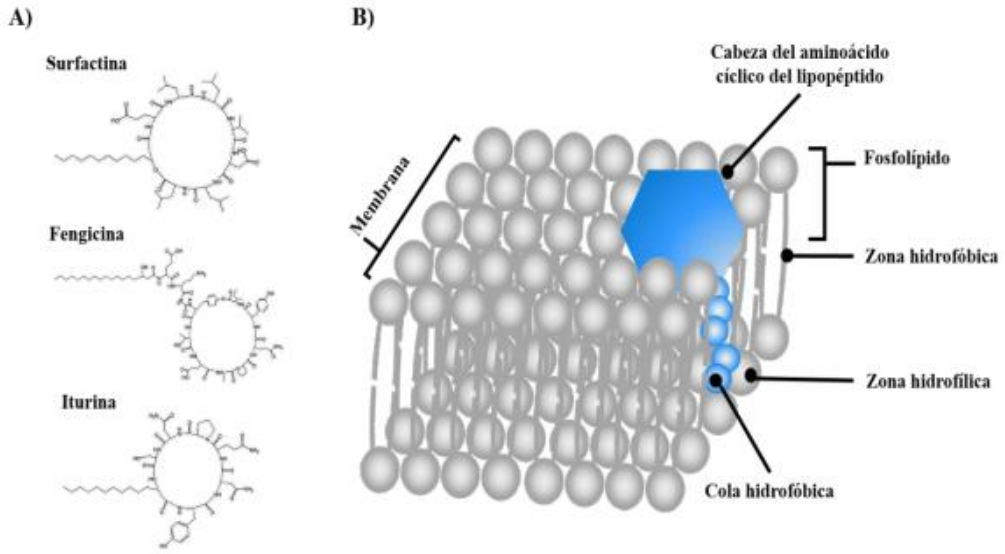


Figura 4. Estructura y mecanismo de acción de los lipopéptidos producidos por *Bacillus* spp. La figura muestra las familias principales de lipopéptidos sintetizados por especies de *Bacillus*, incluyendo surfactina, fengicina e iturina, así como su interacción con las membranas celulares de los fitopatógenos. Debido a su naturaleza anfipática, estos compuestos pueden insertarse en la bicapa lipídica, alterar la permeabilidad de la membrana y provocar pérdida del contenido celular, inhibiendo el crecimiento de hongos y bacterias fitopatógenas. (Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017).

Además de su acción antifúngica, ciertos lipopéptidos también participan en procesos de señalización planta-microorganismo, estimulando respuestas defensivas y favoreciendo la colonización benéfica de la rizósfera. La síntesis de estos metabolitos depende de factores ambientales como disponibilidad de nutrientes, pH y composición del suelo, lo que explica parte de la variabilidad observada en la eficacia de distintas cepas bacterianas bajo condiciones de campo (Sarangi y Ramakrishnan, 2023).

La Figura 4 muestra que los lipopéptidos poseen regiones hidrofóbicas e hidrofílicas que facilitan su inserción en las membranas celulares de los patógenos. Esta interacción provoca alteraciones en la permeabilidad y estabilidad de la membrana, generando pérdida de contenido celular y muerte del microorganismo. Gracias a este mecanismo, *Bacillus* spp. presenta una elevada capacidad para inhibir el crecimiento de diversos hongos y bacterias fitopatógenas.

Además de los lipopéptidos, *Bacillus* spp. produce diversos metabolitos antimicrobianos y compuestos volátiles orgánicos que contribuyen a la inhibición de fitopatógenos. Entre estos compuestos se incluyen antibióticos, sideróforos y sustancias volátiles capaces de afectar el metabolismo y crecimiento de microorganismos perjudiciales. Los sideróforos, por ejemplo, son moléculas con alta afinidad por el hierro, lo que permite a *Bacillus* captar este elemento esencial y reducir su disponibilidad para los patógenos presentes en la rizósfera. Este mecanismo limita el crecimiento microbiano y favorece el establecimiento de bacterias benéficas en el entorno radicular (Miljaković et al., 2020). La competencia por hierro constituye uno de los mecanismos más relevantes en ambientes agrícolas, debido a que este micronutriente suele encontrarse en concentraciones limitadas y es indispensable para numerosos procesos metabólicos microbianos. Al captar hierro eficientemente, *Bacillus* spp. reduce el desarrollo de microorganismos competidores y fortalece su capacidad de colonización radicular.

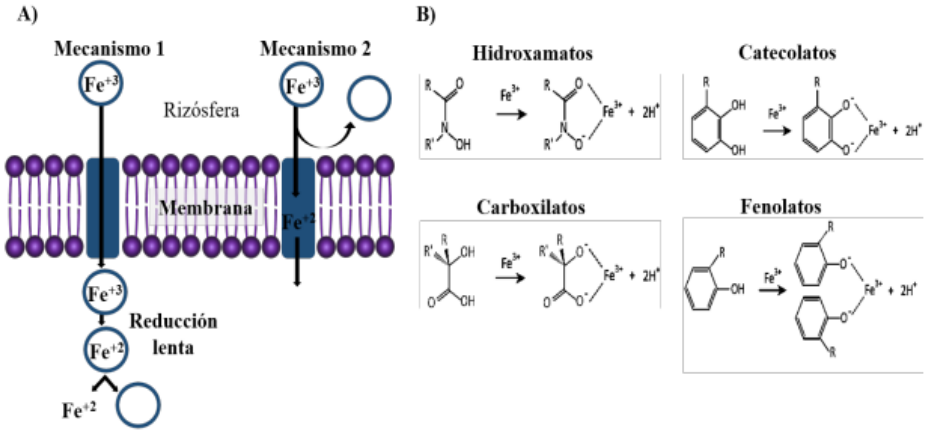


Figura 5. Captura y quelación de hierro mediante sideróforos producidos por *Bacillus* spp. A) La imagen ilustra el mecanismo mediante el cual los sideróforos sintetizados por *Bacillus* capturan hierro férrico (Fe^{3+}) presente en la rizósfera y lo convierten en formas más accesibles para la bacteria. B) Además, se representan diferentes tipos estructurales de sideróforos, como hidroxamatos, catecolatos, carboxilatos y fenolatos. Este proceso disminuye la disponibilidad de hierro para los fitopatógenos y limita su proliferación en el entorno radicular. (Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017).

Asimismo, algunos compuestos volátiles producidos por *Bacillus* spp., como alcoholes, cetonas

y compuestos orgánicos aromáticos, pueden ejercer actividad inhibitoria incluso sin contacto directo con el patógeno. Estas moléculas volátiles pueden difundirse en el suelo y actuar sobre microorganismos cercanos, alterando su metabolismo y reduciendo su capacidad infecciosa. Diversas investigaciones han demostrado que estos compuestos también pueden estimular respuestas fisiológicas beneficiosas en las plantas y favorecer el crecimiento vegetal (Shafi et al., 2017; Tsotetsi et al., 2022).

Los sideróforos son moléculas con alta afinidad por el hierro férrico (Fe3+), lo que permite a *Bacillus* spp. captar este micronutriente esencial en ambientes donde su disponibilidad es limitada. Como consecuencia, disminuye el acceso de los fitopatógenos al hierro necesario para su crecimiento, reduciendo su capacidad de proliferación en la rizósfera.

Otro mecanismo relevante corresponde a la producción de enzimas hidrolíticas extracelulares, como quitinasas, glucanasas, celulasas y proteasas. Estas enzimas tienen la capacidad de degradar componentes estructurales de la pared celular de los hongos fitopatógenos, particularmente quitina y glucanos. Como consecuencia, se produce debilitamiento estructural, lisis celular e inhibición del crecimiento del patógeno. Este mecanismo resulta especialmente importante en el control de hongos del suelo, donde las enzimas liberadas por *Bacillus* actúan directamente sobre las estructuras del microorganismo invasor (Sarangi y Ramakrishnan, 2023). La actividad enzimática también puede facilitar la penetración de otros metabolitos antimicrobianos producidos por la bacteria, generando un efecto combinado que incrementa la inhibición del fitopatógeno. Además, determinadas proteasas degradan proteínas asociadas a procesos de virulencia microbiana, disminuyendo la capacidad infectiva del patógeno (Cawoy et al., 2011).

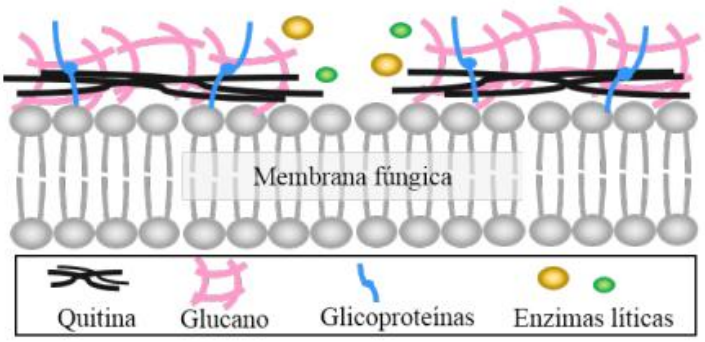


Figura 6. Degradación de la pared celular de hongos fitopatógenos mediante enzimas líticas producidas por *Bacillus* spp. La figura representa la acción de enzimas hidrolíticas extracelulares, como quitinasas y glucanasas, sobre componentes estructurales de la pared celular fúngica, incluyendo quitina, glucanos y glicoproteínas. La degradación de estas estructuras ocasiona debilitamiento celular, alteración de la integridad de la membrana y posterior inhibición del crecimiento del fitopatógeno. (Adaptado de Villarreal-Delgado et al., 2017).

Las enzimas líticas, como quitinasas y glucanasas, actúan sobre componentes esenciales de la pared celular fúngica, incluyendo quitina, glucanos y glicoproteínas. La degradación de estas estructuras provoca debilitamiento celular y favorece la inhibición del crecimiento del patógeno, contribuyendo al efecto biocontrolador de *Bacillus* spp. La competencia por nutrientes y espacio también representa un mecanismo fundamental de biocontrol. Las especies de *Bacillus* poseen una elevada capacidad de colonización de la rizósfera gracias a su movilidad, formación de biofilms y rápida adaptación a diferentes condiciones ambientales. Esta colonización eficiente les permite ocupar nichos ecológicos estratégicos sobre las raíces y limitar el acceso de los patógenos a nutrientes esenciales y sitios de adhesión. Como resultado, disminuye la capacidad de establecimiento y proliferación de microorganismos perjudiciales en el entorno radicular (Ramírez-Pool et al., 2024; Weinand et al., 2023). La colonización exitosa de la rizósfera depende también de la capacidad bacteriana para utilizar exudados radiculares como fuente de carbono y energía. Esta interacción favorece relaciones mutualistas entre la planta y las bacterias benéficas, fortaleciendo la estabilidad microbiana del entorno radicular y reduciendo la presencia de microorganismos patógenos.

Asimismo, *Bacillus* spp. puede activar mecanismos de defensa en las plantas mediante un

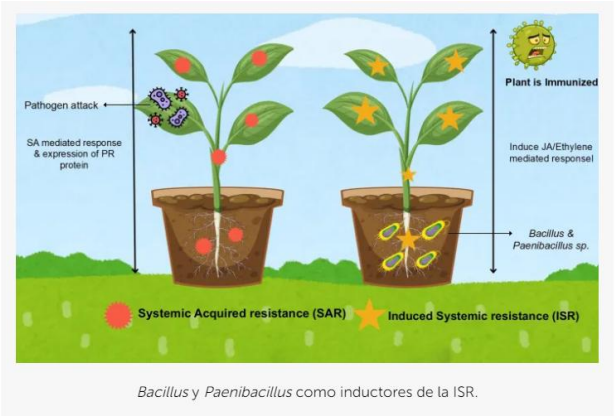
proceso conocido como resistencia sistémica inducida (ISR). Este mecanismo ocurre cuando determinadas moléculas producidas por la bacteria actúan como señales que estimulan respuestas defensivas en la planta antes de que ocurra una infección. La ISR involucra rutas de señalización relacionadas con fitohormonas como jasmonato y etileno, las cuales activan genes asociados a defensa vegetal. Como consecuencia, las plantas desarrollan una respuesta más rápida y eficiente frente al ataque de patógenos, reduciendo la severidad de las enfermedades y aumentando su capacidad de resistencia (Zhao et al., 2021; Tsotetsi et al., 2022). Entre las respuestas inducidas se incluyen producción de proteínas relacionadas con patogénesis, fortalecimiento de la pared celular vegetal, acumulación de compuestos fenólicos y activación de enzimas antioxidantes. Estas respuestas permiten que las plantas respondan con mayor rapidez frente a infecciones posteriores, aumentando su tolerancia frente a múltiples tipos de estrés biótico.

Además, algunas investigaciones recientes indican que la resistencia sistémica inducida puede contribuir también a mejorar la tolerancia frente a estrés abiótico, como salinidad, sequía y cambios extremos de temperatura. Esto demuestra que los mecanismos de acción de *Bacillus* spp. no solo se relacionan con el control de patógenos, sino también con la estabilidad fisiológica y metabólica de las plantas en ambientes agrícolas adversos (Etesami et al., 2023; Tsotetsi et al., 2022).

Miljaković et al. (2020) señalaron que diversas especies de *Bacillus*, entre ellas *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus megaterium* y *Bacillus thuringiensis*, presentan un importante potencial como agentes de control biológico en cultivos agrícolas. En la revisión realizada por estos autores, se reportó actividad antagonista frente a hongos fitopatógenos de relevancia económica, incluyendo *Fusarium* spp., *Rhizoctonia solani*, *Alternaria solani*, *Phytophthora infestans* y *Pyricularia oryzae*, responsables de enfermedades que afectan cultivos como trigo, maíz, arroz, tomate, pepino, soja, girasol y pimiento. Además, se describió actividad inhibitoria contra la bacteria fitopatógena *Clavibacter michiganensis*, causante del cancro bacteriano del tomate. Los autores destacan que la eficacia del biocontrol depende de factores como la especie y cepa bacteriana utilizada, las características fisicoquímicas del suelo, las condiciones

ambientales y las interacciones establecidas con la microbiota nativa (Miljaković et al., 2020).

El efecto biocontrolador de *Bacillus* spp. se atribuye a la producción de diversos metabolitos antimicrobianos, entre ellos antibióticos lipopeptídicos como surfactina, iturina y fengicina, bacteriocinas, enzimas hidrolíticas (quitinasas, celulasas y proteasas) y sideróforos que compiten por el hierro, limitando la disponibilidad de este nutriente para los patógenos. Además, estas bacterias pueden inducir resistencia sistémica inducida (ISR) en las plantas, activando enzimas de defensa como la peroxidasa, la polifenol oxidasa y la fenilalanina amonialiasa, fortaleciendo así las defensas naturales del cultivo. Según Tariq et al. (2025), la ISR inducida por especies de *Bacillus* y *Paenibacillus* involucra la activación coordinada de mecanismos de defensa locales y sistémicos, permitiendo que la planta responda más rápidamente frente al ataque de patógenos. Este proceso incluye la activación de rutas de señalización asociadas con jasmonatos y etileno, así como el fortalecimiento de barreras físicas y bioquímicas de defensa. Sin embargo, factores como la temperatura, la humedad, la disponibilidad de nutrientes y las prácticas agrícolas influyen directamente en la producción de estos metabolitos y en la capacidad de colonización bacteriana de la rizósfera (Miljaković et al., 2020).



Bacillus y *Paenibacillus* como inductores de la ISR.

Figura 7. Mecanismo de inducción de resistencia sistémica en plantas mediado por *Bacillus* y *Paenibacillus*, activando respuestas defensivas locales y sistémicas (Adaptado de Tariq et al., 2025).

Por esta razón, la selección y el desarrollo de cepas con mayor adaptación a condiciones específicas, así como la optimización de formulaciones bacterianas estables y viables, constituyen áreas clave de investigación para mejorar la eficacia y consistencia del biocontrol en campo. Estas estrategias buscan superar las limitaciones relacionadas con la variabilidad observada entre

condiciones de laboratorio, invernadero y campo, permitiendo aprovechar de manera más eficiente el potencial de *Bacillus* spp. como agentes de control biológico y promotores del crecimiento vegetal en sistemas agrícolas sostenibles (Miljaković et al., 2020).

5. *BACILLUS* SPP. COMO PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL (PGPR)

Las bacterias del género *Bacillus* son consideradas importantes rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal o PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) debido a su capacidad de favorecer el desarrollo de las plantas mediante diversos mecanismos fisiológicos y bioquímicos. Estas bacterias establecen interacciones beneficiosas con las raíces y contribuyen tanto a la nutrición vegetal como a la tolerancia frente a condiciones de estrés biótico y abiótico. Gracias a estas propiedades, *Bacillus spp.* ha adquirido gran relevancia en la agricultura sostenible y en el desarrollo de alternativas biológicas para mejorar la productividad agrícola (Tsotetsi et al., 2022; Tariq et al., 2025). Además, la capacidad de estas bacterias para interactuar simultáneamente con la planta y el microbioma del suelo les permite influir de manera integral sobre múltiples procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento, la absorción de nutrientes y la resistencia al estrés ambiental.

Weinand et al. (2023) evaluaron el potencial de diferentes especies de *Bacillus* como PGPR en arroz de tierras bajas, enfocándose en cepas endofíticas aisladas de raíces de arroz. Entre las especies estudiadas destacaron *Bacillus pumilus* D7.4, *Bacillus pumilus* Ni9MO12 y *Bacillus megaterium*. Los resultados mostraron que las cepas de *B. pumilus* fueron capaces de inhibir el crecimiento de hongos fitopatógenos y reducir la incidencia de la mancha parda causada por *Bipolaris oryzae* en determinados cultivares de arroz. Además, estas cepas favorecieron el crecimiento y la biomasa vegetal bajo condiciones de estrés. Por su parte, *B. megaterium* presentó capacidad para producir auxinas, aunque no mostró el mismo efecto de control de la enfermedad observado en *B. pumilus*. Los autores concluyeron que los efectos beneficiosos dependieron tanto de la especie bacteriana como del cultivar de arroz utilizado, evidenciando una interacción específica entre la planta y el microorganismo (Weinand et al., 2023).

Uno de los principales mecanismos mediante los cuales *Bacillus* promueve el crecimiento vegetal es la producción de fitohormonas. Diversas especies son capaces de sintetizar compuestos como ácido indolacético (AIA), giberelinas y citoquininas, los cuales regulan procesos fundamentales del desarrollo vegetal. El ácido indolacético, por ejemplo, estimula la elongación celular y favorece la formación de raíces laterales y pelos radiculares, incrementando la capacidad de absorción de agua y nutrientes por parte de la planta. Estas modificaciones fisiológicas contribuyen directamente al aumento del crecimiento y vigor vegetal en diferentes cultivos agrícolas (Miljaković et al., 2020; Tsotetsi et al., 2022). Las giberelinas participan además en procesos relacionados con la germinación de semillas, elongación del tallo y desarrollo de tejidos vegetales, mientras que las citoquininas favorecen la división celular y retrasan la senescencia foliar. Como resultado, las plantas inoculadas con cepas de *Bacillus* suelen presentar mayor biomasa vegetal, mejor desarrollo radicular y mayor capacidad fotosintética.

Etesami et al. (2023) señalaron que diversas especies de *Bacillus*, entre ellas *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis* y *Bacillus megaterium*, pueden presentar actividad de la enzima ACC desaminasa, la cual contribuye a disminuir los niveles de etileno en las plantas bajo condiciones de estrés. El etileno, aunque actúa como una fitohormona reguladora, puede inhibir el crecimiento vegetal cuando se acumula en exceso durante situaciones adversas como sequía, salinidad o estrés osmótico. La ACC desaminasa cataliza la degradación del 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC), precursor inmediato del etileno, reduciendo así la concentración de esta hormona en la planta. Como resultado, se favorece el crecimiento radicular, mejora la absorción de agua y nutrientes y aumenta la capacidad de adaptación de los cultivos frente a condiciones ambientales desfavorables. Por ello, las especies de *Bacillus* con actividad ACC desaminasa representan una alternativa biotecnológica prometedora para mitigar los efectos del estrés abiótico y mejorar la productividad agrícola (Etesami et al., 2023).

Además de la producción de fitohormonas, *Bacillus spp.* participa activamente en la solubilización de nutrientes minerales presentes en el suelo. Muchas especies poseen la capacidad de transformar compuestos insolubles de fósforo, potasio y otros minerales en formas biodisponibles para las plantas mediante la liberación de ácidos orgánicos y enzimas específicas. Este mecanismo mejora significativamente la disponibilidad de nutrientes esenciales en la rizósfera y favorece la nutrición vegetal, especialmente en suelos con baja fertilidad. Como consecuencia, las plantas presentan un mejor desarrollo radicular y mayor rendimiento productivo (Abuhena, 2024; Altimira et al., 2024). La solubilización de fósforo constituye uno de los procesos más importantes debido a que gran parte de este elemento se encuentra inmovilizado en el suelo en formas no disponibles para las plantas. La actividad microbiana de *Bacillus* permite liberar fosfatos mediante acidificación localizada y producción de compuestos quelantes, incrementando la eficiencia nutricional del cultivo.

Sales y Rigobelo (2024) destacan que diversas especies del género *Bacillus*, particularmente *Bacillus subtilis* y *Bacillus megaterium*, contribuyen a la sostenibilidad agrícola mediante mecanismos que mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo y reducen la dependencia de fertilizantes químicos. Estas bacterias favorecen la movilización y solubilización de micronutrientes esenciales como zinc (Zn) y hierro (Fe), facilitando su absorción por las raíces y promoviendo procesos fisiológicos fundamentales para el desarrollo vegetal, entre ellos la fotosíntesis, la respiración celular y la síntesis de proteínas. Esta capacidad adquiere especial importancia en suelos con baja fertilidad o sometidos a procesos de degradación, donde la disponibilidad de micronutrientes suele ser limitada. Como resultado, la actividad de estas especies bacterianas contribuye a mejorar la eficiencia en el uso de los recursos nutricionales y favorece el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes (Sales y Rigobelo, 2024).

La producción de sideróforos también constituye un mecanismo importante asociado al crecimiento vegetal. Weinand et al. (2023) reportaron diferencias entre especies de *Bacillus* en su capacidad de producir sideróforos. En ensayos realizados con aislamientos endofíticos provenientes

de arroz, *Bacillus pumilus* D7.4 mostró producción detectable de sideróforos, mientras que *B. pumilus* Ni9MO12 y *B. megaterium* no presentaron esta característica en las condiciones evaluadas. Estos resultados evidencian que las propiedades promotoras del crecimiento vegetal pueden variar significativamente entre cepas y especies del mismo género. Estas moléculas presentan alta afinidad por el hierro y permiten captar este elemento del ambiente, facilitando su disponibilidad para la planta y limitando simultáneamente el acceso de microorganismos patógenos. De esta manera, los sideróforos cumplen una doble función: favorecer la nutrición vegetal y contribuir indirectamente a la protección frente a enfermedades. La capacidad de producir sideróforos ha sido ampliamente relacionada con la eficiencia de colonización radicular y la competitividad ecológica de *Bacillus* spp. en la rizósfera (Weinand et al., 2023; Ramírez-Pool et al., 2024). Además de mejorar la adquisición de hierro, los sideróforos pueden modificar la dinámica microbiana del suelo al reducir la proliferación de microorganismos fitopatógenos dependientes de este micronutriente.

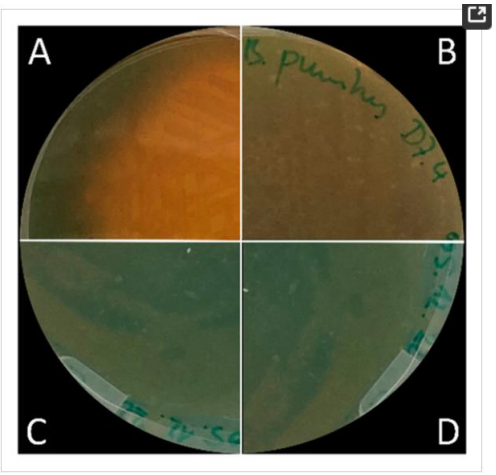


Figura 8. Producción de sideróforos por especies de *Bacillus* en medio de cultivo, evidenciando la capacidad de quelación de hierro. Producción de sideróforos después de 24 h. Las bacterias se cultivaron en placas de TSA durante la noche, luego se cubrieron con agar CAS y se incubaron durante 24 h. El color naranja brillante muestra la producción de sideróforos por Pseudomonas protegens CHAO (A). El desarrollo del color naranja también fue visible en placas de B. pumilus D7.4 (B), mientras que las placas con B. megaterium (C) y B. pumilus Ni9MO12 (D) no mostraron ningún cambio de color. (Adaptado Villarreal-Delgado2017).

Otro aspecto relevante es la capacidad de estas bacterias para estimular el desarrollo del sistema radicular. Tariq et al. (2025) describen que las PGPR del género *Bacillus* modifican la

arquitectura radicular mediante el incremento de raíces laterales y pelos radiculares, aumentando la superficie de absorción de agua y nutrientes. Estas modificaciones favorecen el establecimiento de la planta y contribuyen a un mayor crecimiento y productividad del cultivo. La interacción entre *Bacillus* y las raíces vegetales promueve cambios en la arquitectura radicular, aumentando la superficie de absorción y fortaleciendo el establecimiento de la planta en el suelo. Esta estimulación favorece una mayor captación de nutrientes y agua, así como una mejor adaptación frente a condiciones de estrés hídrico, salinidad y variaciones ambientales. Estudios recientes han demostrado que determinadas cepas de *Bacillus* pueden incrementar significativamente la biomasa vegetal y mejorar la tolerancia de los cultivos frente a condiciones adversas (Li et al., 2022; Etesami et al., 2023).

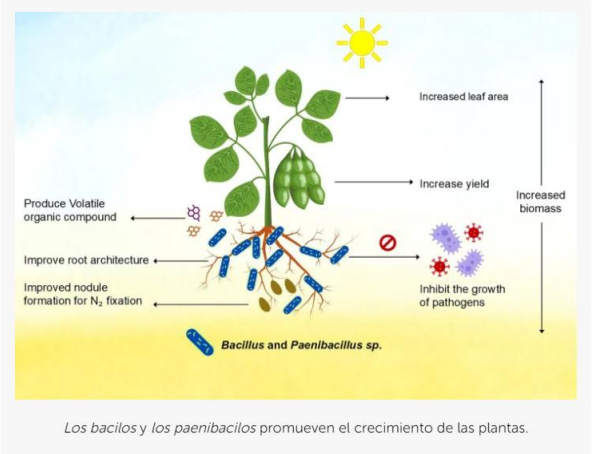


Figura 9. Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) sobre la arquitectura radicular y desarrollo de la planta (Adaptado de Tariq et al., 2025).

Asimismo, diversas investigaciones reportan que *Bacillus* spp. contribuye a mejorar el crecimiento vegetal mediante mecanismos indirectos asociados a la reducción del estrés oxidativo y la activación de respuestas fisiológicas en las plantas. Algunas cepas producen enzimas antioxidantes y metabolitos que disminuyen los efectos negativos generados por factores ambientales extremos, favoreciendo el mantenimiento de la actividad metabólica y fotosintética de los cultivos. Estas propiedades resultan particularmente importantes en el contexto actual de cambio climático y degradación de los sistemas agrícolas (Tsotetsi et al., 2022; Weinand et al., 2023). Entre las enzimas antioxidantes relacionadas con estos procesos destacan catalasas, peroxidasas y superóxido

dismutasa, las cuales ayudan a neutralizar especies reactivas de oxígeno generadas durante situaciones de estrés ambiental.

Ji et al. (2022) evidenciaron que la inoculación combinada de *Bacillus subtilis* HG-15 y *Bacillus velezensis* JC-K3 en trigo sometido a estrés salino mejoró significativamente diversos parámetros fisiológicos, entre ellos el contenido relativo de clorofila (SPAD), la tasa neta de fotosíntesis (Pn), la tasa de transpiración (Tr) y la eficiencia en el uso del agua en hojas (WUEL). Estos cambios se asociaron con un incremento en la formación de granos por espiga, un mayor rendimiento del cultivo y una reducción en la incidencia de enfermedades. Estos resultados demuestran la influencia multifactorial de las PGPR sobre el metabolismo vegetal y respaldan su potencial para mejorar la productividad agrícola bajo condiciones ambientales adversas.

Altimira et al. (2024) evaluaron el efecto de las especies *Bacillus safensis* y *Bacillus siamensis* en el cultivo de tomate bajo un esquema de fertilización reducida, demostrando que ambas bacterias favorecen significativamente el crecimiento y la productividad del cultivo. Los autores observaron mejoras en el desarrollo vegetal y en el rendimiento de la cosecha, evidenciando que estas cepas pueden actuar como promotores del crecimiento vegetal y contribuir a una agricultura más sostenible. Además, se reportó que la inoculación con estas bacterias permitió mantener una adecuada producción incluso bajo condiciones limitantes, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos. Estos resultados demuestran el potencial de *Bacillus safensis* y *Bacillus siamensis* como herramientas biotecnológicas para optimizar la productividad agrícola y fortalecer la resiliencia de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas (Altimira et al., 2024).

Finalmente, el uso de *Bacillus spp.* como PGPR representa una estrategia prometedora para disminuir la dependencia de fertilizantes químicos y promover prácticas agrícolas más amigables con el ambiente. La combinación de mecanismos relacionados con nutrición vegetal, promoción del crecimiento y protección frente al estrés convierte a estas bacterias en componentes clave dentro de

la agricultura moderna y sostenible (Sales y Rigobelo, 2024; Gayithri et al., 2026). Además, la integración de microorganismos benéficos en programas agrícolas sostenibles contribuye a mejorar la salud del suelo, conservar la biodiversidad microbiana y reducir el impacto ambiental asociado al uso intensivo de agroquímicos. Por ello, las PGPR basadas en *Bacillus* continúan consolidándose como una de las alternativas biológicas más importantes para la agricultura del futuro.

6. APLICACIONES AGRONÓMICAS DE *BACILLUS* SPP.

6.1 BENEFICIOS Y APLICACIONES AGRONÓMICAS DE *BACILLUS* SPP.

Las especies del género *Bacillus*, entre ellas *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus circulans* y *Bacillus cereus*, han sido ampliamente estudiadas por sus aplicaciones agropecuarias. Sin embargo, no todas presentan las mismas funciones ni el mismo nivel de seguridad o eficacia. Especies como *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* y *B. velezensis* son reconocidas por sus propiedades promotoras del crecimiento vegetal y su capacidad de biocontrol frente a diversos fitopatógenos, mientras que *B. megaterium* destaca por su capacidad para solubilizar fósforo y favorecer la nutrición vegetal. Por otro lado, algunas cepas de *B. cereus* pueden producir toxinas asociadas a intoxicaciones alimentarias, por lo que su utilización requiere una evaluación y selección rigurosa. Debido a estas diferencias, la elección de especies y cepas específicas resulta fundamental para garantizar aplicaciones seguras y efectivas en agricultura sostenible (Sales y Rigobelo, 2024; Galkin y Ruzhanskyi, 2024). Además, el interés creciente por reducir los efectos negativos de los pesticidas químicos ha impulsado el desarrollo de estrategias agrícolas basadas en microorganismos benéficos capaces de mantener la productividad sin comprometer la sostenibilidad ambiental.

Una de las principales aplicaciones de *Bacillus* spp. corresponde al desarrollo de biopesticidas. Diversas cepas producen metabolitos antimicrobianos, lipopéptidos y enzimas capaces de inhibir el crecimiento de hongos, bacterias y otros fitopatógenos. Estas propiedades han permitido formular productos biológicos destinados al control de enfermedades agrícolas causadas por microorganismos

del suelo y patógenos foliares. El uso de biopesticidas basados en *Bacillus* presenta ventajas importantes, incluyendo menor toxicidad ambiental, menor riesgo para la salud humana y reducción de residuos químicos en los alimentos (Cawoy et al., 2011; Dobrzyński et al., 2023). Asimismo, muchas formulaciones comerciales poseen una elevada estabilidad debido a la capacidad de *Bacillus* para formar endosporas resistentes, lo que facilita su almacenamiento, transporte y aplicación en diferentes sistemas agrícolas.

Los biopesticidas elaborados a partir de *Bacillus* spp. pueden aplicarse mediante tratamientos de semillas, aplicaciones foliares o incorporación directa al suelo, dependiendo del tipo de cultivo y del fitopatógeno objetivo. Esta versatilidad de aplicación ha permitido ampliar su utilización en cultivos hortícolas, cereales, leguminosas y frutales de importancia económica. Además, diversos estudios indican que el uso combinado de cepas bacterianas puede aumentar la eficacia del control biológico mediante mecanismos sinérgicos entre metabolitos antimicrobianos y procesos de colonización radicular (Miljaković et al., 2020).

Además de su aplicación como agentes de biocontrol, *Bacillus* spp. se utiliza ampliamente en la producción de biofertilizantes. Estas bacterias favorecen la disponibilidad de nutrientes esenciales mediante procesos de solubilización de fósforo, producción de sideróforos y estimulación del desarrollo radicular. Como consecuencia, se incrementa la eficiencia en la absorción de nutrientes y mejora el crecimiento de los cultivos. La incorporación de biofertilizantes bacterianos permite reducir parcialmente el uso de fertilizantes químicos y disminuir los costos asociados a la producción agrícola (Abuhena, 2024; Altimira et al., 2024). El uso de biofertilizantes también contribuye a mejorar propiedades físicas y biológicas del suelo, favoreciendo la actividad microbiana y aumentando la disponibilidad de nutrientes a largo plazo. Estas características resultan especialmente relevantes en sistemas agrícolas afectados por degradación del suelo y pérdida de fertilidad.

En algunos cultivos agrícolas, la inoculación con *Bacillus* spp. ha demostrado incrementar significativamente parámetros productivos como biomasa vegetal, número de frutos, rendimiento total y calidad nutricional de los productos agrícolas. Además, la combinación de biofertilizantes

bacterianos con dosis reducidas de fertilizantes químicos ha mostrado resultados positivos en términos de productividad y sostenibilidad agrícola (Altimira et al., 2024).

Las aplicaciones agronómicas de *Bacillus* se han reportado en numerosos cultivos de importancia económica. En tomate, arroz, trigo, soya y otros sistemas agrícolas, la inoculación con cepas bacterianas ha mostrado efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, rendimiento productivo y resistencia frente a enfermedades y estrés ambiental. Estas bacterias pueden aplicarse mediante tratamientos de semillas, inoculación del suelo o aplicaciones foliares, dependiendo del tipo de cultivo y objetivo agronómico. La capacidad de formar endosporas facilita además su almacenamiento y formulación comercial, aumentando su estabilidad y viabilidad durante la aplicación en campo (Miljaković et al., 2020; Tariq et al., 2025). En arroz y otros cultivos sometidos a inundación o salinidad, algunas cepas bacterianas han mostrado capacidad para mejorar la tolerancia fisiológica de las plantas y reducir los efectos negativos del estrés ambiental. Del mismo modo, en cultivos hortícolas se ha observado reducción significativa de enfermedades radiculares asociadas a hongos fitopatógenos gracias a la aplicación de cepas de *Bacillus* con actividad antifúngica.

Otra ventaja importante del uso de *Bacillus* spp. es su contribución a la sostenibilidad agrícola. A diferencia de muchos agroquímicos convencionales, estas bacterias presentan menor impacto sobre organismos no objetivo y favorecen el equilibrio microbiológico del suelo. Asimismo, ayudan a disminuir problemas asociados al uso excesivo de pesticidas y fertilizantes, como contaminación ambiental, pérdida de biodiversidad y generación de resistencia en patógenos. Por esta razón, el uso de microorganismos benéficos se considera una herramienta fundamental dentro de los programas de agricultura sostenible y manejo integrado de cultivos (Sales y Rigobelo, 2024; Gayithri et al., 2026). La incorporación de microorganismos benéficos en sistemas agrícolas también favorece la conservación de la microbiota nativa y contribuye al mantenimiento de procesos ecológicos esenciales relacionados con el reciclaje de nutrientes y la estabilidad del suelo. Además, el uso de bioinsumos microbianos se relaciona con la creciente demanda mundial de productos agrícolas obtenidos mediante prácticas más sostenibles y amigables con el ambiente. Esto ha impulsado el interés

comercial y científico por desarrollar formulaciones biológicas más eficientes y adaptadas a diferentes condiciones de cultivo (Galkin y Ruzhanskyi, 2024).

6.2 FACTORES AMBIENTALES, EDÁFICOS Y BIOLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LA EFICACIA DE *BACILLUS* SPP. EN CAMPO

La eficacia de *Bacillus* spp. en aplicaciones agrícolas depende de múltiples factores ambientales, edáficos y biológicos que condicionan su supervivencia, capacidad de colonización y actividad como promotores del crecimiento vegetal o agentes de biocontrol. Según Galkin y Ruzhanskyi (2024), las condiciones ambientales constituyen uno de los principales factores que determinan el desempeño de estas bacterias en campo. Por ejemplo, la capacidad de *Bacillus subtilis* para formar endosporas le permite resistir condiciones adversas como sequía y altas temperaturas, favoreciendo su persistencia en el suelo. Sin embargo, la eficacia observada en condiciones controladas no siempre se mantiene en campo abierto. En estudios realizados contra *Plasmodiophora brassicae*, agente causal de la hernia de las crucíferas, algunas cepas de *B. subtilis* lograron reducir la incidencia del patógeno en más del 80 % bajo condiciones de invernadero, mientras que en campo la eficacia disminuyó considerablemente debido a las fluctuaciones ambientales y a la complejidad del ecosistema agrícola (Galkin y Ruzhanskyi, 2024).

Los factores edáficos también desempeñan un papel fundamental en la actividad de *Bacillus* spp.. Características como el pH, la textura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de materia orgánica y la salinidad pueden modificar significativamente la capacidad de establecimiento y funcionamiento de estas bacterias. Galkin y Ruzhanskyi (2024) destacan que *Bacillus subtilis* participa activamente en la movilización de fósforo mediante la producción de ácidos orgánicos capaces de solubilizar formas poco disponibles de este nutriente. Asimismo, puede favorecer la absorción de hierro mediante la acidificación localizada de la rizósfera y la activación de mecanismos relacionados con la adquisición de este micronutriente por parte de las plantas. No obstante, condiciones de alta salinidad pueden limitar la colonización bacteriana y reducir la eficacia de estas interacciones beneficiosas.

Además de los factores ambientales y edáficos, las interacciones biológicas presentes en la rizósfera constituyen un elemento determinante para el éxito de las aplicaciones basadas en *Bacillus* spp.. Las bacterias introducidas deben competir con la microbiota nativa por espacio, nutrientes y sitios de colonización radicular. Algunas interacciones pueden afectar negativamente su establecimiento; por ejemplo, *Pseudomonas protegens* produce compuestos capaces de inhibir la formación de biopelículas en *Bacillus subtilis*, limitando su capacidad de colonización. Sin embargo, también se han descrito relaciones sinérgicas entre especies bacterianas. La coinoculación de *B. subtilis* y *Bacillus licheniformis* ha mostrado efectos positivos sobre el crecimiento y desarrollo de cultivos como tomate y pimiento, evidenciando que ciertas asociaciones microbianas pueden potenciar los beneficios observados en las plantas (Galkin y Ruzhanskyi, 2024).

Otro aspecto importante corresponde a las diferencias fisiológicas y genéticas existentes entre cepas bacterianas. No todas las cepas de *Bacillus* poseen la misma capacidad para producir metabolitos antimicrobianos, sintetizar fitohormonas, formar biopelículas o tolerar condiciones de estrés ambiental. Por ejemplo, mientras la producción de surfactina está ampliamente distribuida en diversas cepas, otros compuestos antimicrobianos como la subtilina son sintetizados únicamente por cepas específicas, lo que les confiere ventajas particulares frente a determinados microorganismos fitopatógenos. Por esta razón, la selección de cepas adaptadas a las condiciones locales de suelo, clima y cultivo constituye una estrategia fundamental para garantizar la estabilidad y eficacia de los bioinsumos bacterianos en sistemas agrícolas reales (Galkin y Ruzhanskyi, 2024; Ortiz et al., 2025).

En conjunto, la eficacia de *Bacillus* spp. en campo depende de la interacción entre las características de la cepa bacteriana, las condiciones ambientales y edáficas, la microbiota presente en el suelo y el cultivo objetivo. Por ello, el desarrollo de aplicaciones agrícolas basadas en estas bacterias requiere una evaluación integral de todos estos factores para maximizar sus beneficios en sistemas de producción sostenibles.

6.3 LIMITACIONES Y DESAFÍOS EN LA APLICACIÓN AGRÍCOLA DE *BACILLUS* SPP.

A pesar de los múltiples beneficios asociados al uso de *Bacillus* spp. en agricultura sostenible,

su aplicación eficiente y consistente en condiciones reales de campo aún enfrenta diversas limitaciones. Como señalan Galkin y Ruzhanskyi (2024), uno de los principales desafíos corresponde a la variabilidad ambiental, ya que factores como la temperatura, el pH del suelo, la humedad y las interacciones con la microbiota nativa pueden afectar significativamente la supervivencia, colonización y actividad biocontroladora de estas bacterias. Por ejemplo, cepas de *Bacillus subtilis* que han mostrado una alta capacidad para reducir la severidad de enfermedades en condiciones controladas de laboratorio o invernadero presentan una eficacia menor cuando son evaluadas en campo, debido a la complejidad y variabilidad de las condiciones ambientales naturales.

Otro desafío importante radica en las diferencias fisiológicas y genéticas existentes entre cepas bacterianas. Según Galkin y Ruzhanskyi (2024), distintas cepas de *Bacillus subtilis*, *Bacillus velezensis* y otras especies del género poseen capacidades variables para producir metabolitos antimicrobianos, fitohormonas y enzimas relacionadas con la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico. Esta diversidad implica que una cepa efectiva en determinado cultivo o ambiente no necesariamente mantendrá el mismo desempeño en otras condiciones agrícolas, por lo que resulta indispensable realizar procesos de selección y adaptación específicos para cada sistema productivo.

La formulación y estabilidad de los bioinsumos basados en *Bacillus* spp. también representan una limitación relevante. Aunque estas bacterias poseen la ventaja de formar endosporas resistentes que favorecen su conservación durante el almacenamiento y transporte, Galkin y Ruzhanskyi (2024) indican que todavía existen dificultades relacionadas con el mantenimiento de la viabilidad bacteriana, la estabilidad de las formulaciones y la consistencia de los resultados obtenidos en campo. Diferencias en los métodos de producción, almacenamiento y aplicación pueden generar variaciones importantes en la eficacia de los productos biológicos.

Asimismo, la adopción de estos bioinsumos continúa enfrentando barreras técnicas, económicas y regulatorias. El uso histórico de fertilizantes y pesticidas químicos ha limitado la incorporación de alternativas biológicas en muchos sistemas agrícolas. Además, la necesidad de generar mayor evidencia científica sobre la eficacia de *Bacillus* spp. en diferentes condiciones

agroecológicas, junto con los costos de producción, los procesos regulatorios y la capacitación de los agricultores, siguen representando obstáculos para una implementación más amplia de estas tecnologías (Galkin y Ruzhanskyi, 2024; Ortiz et al., 2025).

Finalmente, la interacción con la microbiota nativa del suelo constituye otro factor limitante. Las cepas introducidas deben competir con microorganismos autóctonos por nutrientes y sitios de colonización en la rizósfera. Algunas interacciones pueden ser antagonistas y reducir la eficacia de los inoculantes bacterianos. Un ejemplo reportado por Galkin y Ruzhanskyi (2024) es el caso de *Pseudomonas protegens*, capaz de inhibir la formación de biofilms de *Bacillus subtilis*, disminuyendo su capacidad de colonización radicular y, por tanto, su potencial como agente de biocontrol..

En conjunto, estos desafíos evidencian que el éxito de *Bacillus* spp. en agricultura depende no solo de las propiedades inherentes de las cepas bacterianas, sino también de factores ambientales, biológicos, tecnológicos y regulatorios que deben considerarse para garantizar una aplicación eficiente y sostenible en condiciones reales de campo.

7. PERSPECTIVAS BIOTECNOLÓGICAS DE *BACILLUS* SPP.

Como señalan Gayithri M. y colaboradores (2026), el creciente interés por desarrollar sistemas agrícolas sostenibles ha impulsado el estudio biotecnológico de las especies del género *Bacillus*, debido a su capacidad para producir metabolitos bioactivos, formar endosporas resistentes y establecer interacciones beneficiosas con las plantas. Los avances en herramientas ómicas, como genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica, han permitido comprender con mayor profundidad los mecanismos moleculares involucrados en el biocontrol y la promoción del crecimiento vegetal. Por ejemplo, los análisis transcriptómicos han identificado genes relacionados con la síntesis de lipopéptidos antimicrobianos, la formación de biofilms, la motilidad bacteriana y la tolerancia al estrés ambiental, mientras que los estudios proteómicos y metabolómicos han permitido confirmar la producción de enzimas y metabolitos implicados en la resistencia sistémica inducida y el crecimiento vegetal.

Una de las principales perspectivas biotecnológicas corresponde a la bioingeniería de cepas bacterianas. Según Gayithri et al. (2026), las herramientas genómicas y de ingeniería metabólica permiten optimizar la producción de metabolitos antimicrobianos, mejorar la colonización radicular y aumentar la tolerancia frente a condiciones de estrés abiótico. Estas estrategias buscan desarrollar cepas capaces de combinar simultáneamente funciones de biocontrol y biofertilización, incrementando la eficiencia de los bioinsumos microbianos utilizados en agricultura sostenible.

Otra línea de investigación importante es el desarrollo de formulaciones microbianas más eficientes y estables. Aunque las especies de *Bacillus* presentan ventajas asociadas a la formación de endosporas resistentes, Gayithri et al. (2026) destacan que todavía existen desafíos relacionados con la estabilidad en campo, la viabilidad durante el almacenamiento y la adaptación a diferentes condiciones ambientales. Por esta razón, actualmente se investigan tecnologías de microencapsulación, matrices protectoras y formulaciones bacterianas mejoradas que permitan incrementar la supervivencia y eficacia de las cepas después de su aplicación. Además, los autores resaltan el potencial de combinar *Bacillus* con otros microorganismos benéficos, como hongos del género *Trichoderma* y hongos micorrícicos, con el objetivo de generar efectos sinérgicos sobre la protección y el crecimiento de los cultivos.

La producción industrial de bioinsumos basados en *Bacillus* también representa una perspectiva relevante. Gayithri et al. (2026) señalan que la optimización de procesos de fermentación constituye un aspecto fundamental para incrementar la producción de biomasa bacteriana y metabolitos bioactivos de manera rentable y sostenible. Para ello, se estudia el control de parámetros como pH, temperatura, oxigenación y composición nutricional del medio de cultivo, con el fin de maximizar el rendimiento de las cepas comerciales y facilitar la producción a gran escala de biofertilizantes y biopesticidas.

Asimismo, los autores destacan que la integración de herramientas ómicas con enfoques ecológicos permitirá comprender con mayor detalle las interacciones entre *Bacillus*, las plantas y la microbiota del suelo. Este conocimiento facilitará la identificación de genes, proteínas y metabolitos involucrados en la promoción del crecimiento vegetal y en los mecanismos de biocontrol, favoreciendo la selección de cepas más eficientes y adaptadas a diferentes agroecosistemas.

Finalmente, Gayithri et al. (2026) concluyen que la integración de la biotecnología moderna, las herramientas ómicas y las estrategias ecológicas permitirá desarrollar cepas de *Bacillus* más eficaces, resilientes y adaptadas a múltiples condiciones agrícolas. Estos avances consolidan a *Bacillus* spp. como uno de los grupos microbianos con mayor potencial para el desarrollo de bioinsumos innovadores y para la construcción de sistemas agrícolas más sostenibles, productivos y resilientes frente a los desafíos ambientales futuros.

6. CONCLUSIONES

1. El género *Bacillus* spp. constituye uno de los grupos bacterianos con mayor potencial para la agricultura sostenible debido a su capacidad de desempeñar simultáneamente funciones de biocontrol y promoción del crecimiento vegetal. La revisión bibliográfica realizada permitió evidenciar que especies como *Bacillus subtilis, Bacillus velezensis, Bacillus amyloliquefaciens, Bacillus safensis, Bacillus siamensis y Bacillus megaterium* participan activamente en procesos que favorecen la salud y productividad de los cultivos. Estas características han convertido a *Bacillus* spp. en una alternativa biológica viable para reducir la dependencia de agroquímicos convencionales y contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y ambientalmente responsables.
2. Los mecanismos de biocontrol ejercidos por *Bacillus* spp. son diversos y complementarios. Entre ellos destacan la producción de lipopéptidos antimicrobianos como surfactina, iturina y fengicina, la síntesis de bacteriocinas, la producción de enzimas hidrolíticas capaces de degradar estructuras celulares de los fitopatógenos, la competencia por nutrientes mediante sideróforos y la inducción de resistencia sistémica en las plantas. La acción conjunta de estos mecanismos permite disminuir la incidencia de enfermedades causadas por hongos y bacterias fitopatógenas, fortaleciendo las defensas naturales de los cultivos y reduciendo la necesidad de aplicar productos químicos para el control de enfermedades agrícolas.
3. Como rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las especies de *Bacillus* favorecen el desarrollo de las plantas mediante múltiples mecanismos fisiológicos y bioquímicos. Entre ellos se encuentran la producción de fitohormonas como auxinas, la actividad ACC desaminasa que disminuye los efectos negativos del estrés asociado al etileno, la solubilización de fósforo, la movilización de micronutrientes esenciales como hierro y zinc mediante sideróforos, y la mejora de la absorción de agua y nutrientes. Estas actividades permiten incrementar el crecimiento radicular, optimizar procesos fisiológicos como la

fotosíntesis y favorecer una mayor productividad de los cultivos, especialmente bajo condiciones de estrés ambiental.

4. La eficacia de *Bacillus* spp. en condiciones de campo depende de una compleja interacción entre factores ambientales, edáficos y biológicos. Variables como temperatura, humedad, radiación solar, disponibilidad de agua, pH del suelo, salinidad, contenido de materia orgánica y composición de la microbiota nativa pueden influir significativamente en la supervivencia, colonización y actividad metabólica de las bacterias. Además, existen diferencias importantes entre especies y cepas respecto a la producción de metabolitos, formación de biofilms y adaptación a distintos ambientes agrícolas. Por ello, la selección adecuada de cepas y la evaluación de las condiciones locales constituyen aspectos fundamentales para obtener resultados consistentes en aplicaciones agrícolas.
5. A pesar de los numerosos beneficios documentados, la implementación de *Bacillus* spp. como bioinsumo agrícola todavía enfrenta desafíos importantes. La variabilidad en la respuesta observada entre ensayos de laboratorio y condiciones reales de campo, las dificultades relacionadas con formulación, almacenamiento y estabilidad de los productos biológicos, así como la competencia con microorganismos nativos, pueden limitar su desempeño. Adicionalmente, factores económicos, regulatorios y de adopción tecnológica continúan representando barreras para su utilización masiva. Estas limitaciones evidencian la necesidad de continuar desarrollando investigaciones orientadas a optimizar formulaciones, procesos de producción y estrategias de aplicación adaptadas a diferentes sistemas agrícolas.
6. Las perspectivas futuras de *Bacillus* spp. son altamente prometedoras gracias a los avances en biotecnología, ingeniería genética y herramientas ómicas. La genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica han permitido comprender con mayor profundidad los mecanismos moleculares involucrados en el biocontrol y la promoción del crecimiento vegetal, facilitando la selección de cepas más eficientes y adaptadas a diferentes condiciones ambientales. Asimismo, el desarrollo de formulaciones mejoradas, tecnologías de

encapsulación, consorcios microbianos y procesos industriales optimizados permitirá incrementar la eficacia y estabilidad de los bioinsumos basados en *Bacillus.* En conjunto, estos avances consolidan a este género bacteriano como una de las herramientas biotecnológicas más relevantes para enfrentar los desafíos de la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria en el futuro.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abuhena, M. (2024). *An overview of Bacillus species in agriculture for growth promotion, biocontrol and dry tolerance*. ES Food & Agroforestry, 18, 1321. https://doi.org/10.30919/esfaf1321

Altimira, F., Godoy, S., Arias-Aravena, M., Vargas, N., González, E., Dardón, E., Montenegro, E., Viteri, I., & Tapia, E. (2024). Reduced fertilization supplemented with *Bacillus safensis* and *Bacillus siamensis* promotes tomato production in a sustainable way. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1451887. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1451887

Cawoy, H., Bettiol, W., Fickers, P., & Ongena, M. (2011). *Control biológico de enfermedades de las plantas basado en Bacillus* (*Bacillus*-based biological control of plant diseases). En M. Stoytcheva (Ed.), *Pesticidas en el mundo moderno: uso y gestión de pesticidas* (pp. 273–302). InTech. https://doi.org/10.5772/17184

Dobrzyński, J., Jakubowska, Z., Kulkova, I., Kowalczyk, P., & Kramkowski, K. (2023). *Biocontrol of fungal phytopathogens by Bacillus pumilus*. Frontiers in Microbiology, 14, 1194606. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1194606

Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2023). Potential use of *Bacillus spp.* as an effective biostimulant against abiotic stresses in crops: A review. *Microbiological Research*, 281, 127602. https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127602

Galkin, M. B., & Ruzhanskyi, B. P. (2024). *The role of Bacillus spp. in sustainable agriculture and biocontrol*. Мікробіологія і біотехнологія, 3(62), 6–32. https://dspace.onu.edu.ua/items/7f1eac5c-a311-4da1-820c-3e2e08555af8

Gayithri, M., Singh, S., Pradhan, B., Boorla, V., & Chand, S. (2026). Multifunctional roles of *Bacillus spp.* in sustainable agriculture: Advances in biocontrol, omics, and ecological applications. *Microbial Ecology*, 89, 55. https://doi.org/10.1007/s00248-026-02709-2

Li, X., Zang, H., & Zhao, X. (2022). Biocontrol and plant growth promotion by combined Bacillus spp. inoculum under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, (open access) … https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1043171

Miljaković, D., Marinković, J., & Balešević-Tubić, S. (2020). The Significance of *Bacillus* spp. in Disease Suppression and Growth Promotion of Field and Vegetable Crops. *Microorganisms*, *8*(7), 1037. https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037

Ortiz, A., Sansinenea, E., Keswani, C., Minkina, T., & Singh, S. P. (2025). Bioengineering *Bacillus spp.* for sustainable crop production: Recent advances and resources for biotechnological applications. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44, 1868–1885. https://doi.org/10.1007/s00344-024-11553-y

Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2013). *Pesticide productivity and food security: A review*. Agronomy for Sustainable Development, 33(1), 243–255. https://doi.org/10.1007/s13593-012-0105-x

Ramírez-Pool, J. A., Calderón-Pérez, B., Ruiz-Medrano, R., Ortiz-Castro, R., & Xoconostle-Cazares, B. (2024). *Bacillus strains as effective biocontrol agents against phytopathogenic bacteria and promoters of plant growth*. *Microbial Ecology*, 87, Article 76. https://doi.org/10.1007/s00248-024-02384-1

Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2024). The role of *Bacillus sp.* in reducing chemical inputs for sustainable crop production. *Agronomy*, 14(11), 2723. https://doi.org/10.3390/agronomy14112723

Sarangi, T., & Ramakrishnan, S. (2023). *Biocontrol potential and mechanism of Bacillus spp. against phytopathogens: A review*. International Journal of Environment and Climate Change, 13(7), 512-527. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i71904

Shafi, J., Tian, H., & Ji, M. (2017). *Bacillus species as versatile weapons for plant pathogens: A review*.*Biotechnology & Biotechnological Equipment, 31*(3), 446-459. https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950

Tariq, H., Subramanian, S., Geitmann, A., & Smith, D. L. (2025). *Bacillus* and *Paenibacillus* as plant growth-promoting bacteria in soybean and cannabis. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1529859. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1529859

Tsotetsi, T., Nephali, L., Malebe, M., & Tugizimana, F. (2022). *Bacillus for Plant Growth Promotion and Stress Resilience: What Have We Learned?* Plants, 11(19), 2482. https://doi.org/10.3390/plants11192482

Villarreal-Delgado, M. F., Villa-Rodríguez, E. D., Cira-Chávez, L. A., Estrada-Alvarado, M. I., Parra-Cota, F. I., & De los Santos-Villalobos, S. (2017). *The genus Bacillus as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity*. Revista Mexicana de Fitopatología, 36(1), 95-130. https://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v36n1/2007-8080-rmfi-36-01-95.pdf

Weinand, T., Hasan, A., & Asch, F. (2023). *Role of Bacillus spp. plant growth-promoting properties*

in mitigating biotic and abiotic stresses in lowland rice (Oryza sativa L.). *Microorganisms*, 11(9), 2327. https://doi.org/10.3390/microorganisms11092327

Zhao, H., Wang, X., & Wang, W. (2021). *Bacillus amyloliquefaciens SN16-1-Induced Resistance System of the Tomato against Rhizoctonia solani*. *Pathogens*, 11(1), 35. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8780726/