

Microbichos



Aliados invisibles: Bacterias al servicio de nuestros cultivos

Invisible allies: Bacteria at the service of our crops

Isaí Ismael Bahena-Contreras¹

Macdiel Acevedo-Quiroz^{1*}

Patricia Álvarez-Fitz²

Resumen

Cuando vemos un campo verde y saludable, pocas veces pensamos en las batallas invisibles que ocurren bajo tierra. Entre raíces, agua y minerales, las bacterias benéficas combaten hongos fitopatógenos que amenazan cultivos clave como el jitomate, maíz, mango y aguacate. Algunas bacterias del género *Bacillus* producen compuestos capaces de frenar estos ataques, ofreciendo una alternativa natural y efectiva al uso de químicos. En este artículo exploramos el poder oculto de estos microorganismos y cómo su actividad puede marcar la diferencia en la salud de nuestras plantas.

Palabras clave: *Bacillus*, control biológico, fitopatógenos.

Summary

When we see a green, healthy field, we rarely think about the invisible battles taking place underground. Among roots, water and minerals, beneficial bacteria fight phytopathogenic fungi that threaten key crops like tomato, corn, mango and avocado. Some *Bacillus* species produce compounds capable of stopping these attacks, offering a natural and effective alternative to chemical controls. In this article, we explore the hidden power of these microorganisms and how their activity can make a difference in the health of our crops.

Keywords: *Bacillus*, biological control, phytopathogens.

¹Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Zacatepec, Av. Instituto Tecnológico No. 27, Col. Centro, Zacatepec de Hidalgo, CP 62780, Morelos, México.

²Investigadoras e investigadores por México-Secihti-UAGro, Guerrero, México.

*Autor para la correspondencia:
macdiel.aq@zacatepec.tecnm.mx

La rizosfera, esa franja milimétrica de suelo que envuelve las raíces, es un universo invisible del que depende buena parte de la vida en la superficie. Este microhábitat, las raíces y su microbioma (bacterias, hongos) forman alianzas, libran enfrentamientos y, sin que lo sepamos, se decide si un cultivo crecerá sano o se perderá por completo. Es un mundo oculto donde la competencia y la cooperación microbiana definen el control de las raíces. En ese escenario subterráneo, microorganismos como *Bacillus* ayudan a las plantas a defenderse de hongos fitopatógenos que las atacan desde el suelo. Lo que ocurre a nivel microscópico podría transformar la forma en que cultivamos y protegemos nuestros alimentos. Mientras cuidamos la planta desde arriba, bajo tierra suceden historias complejas de cooperación y conflicto. Es en ese mundo secreto donde ciertas bacterias destacan no solo por adaptarse, sino por combatir y proteger.

¿Qué pasa bajo la tierra?

Justo donde las raíces se extienden en busca de agua y nutrientes, bajo nuestros pies, tiene lugar una batalla silenciosa. Allí coexisten, y a menudo compiten, millones de microorganismos. Entre los principales invasores se encuentran los hongos fitopatógenos, que tienen como objetivo infectar a las plantas, robarles nutrientes y debilitarlas desde dentro. Destacan géneros como *Fusarium*, *Botrytis* y *Colletotrichum* (ver Figura 1), cuyas esporas tienen la capacidad de propagarse por el aire o el agua, alcanzando nuevas plantas huésped. Además, pueden permanecer latentes en el suelo hasta que las condiciones sean favorables. Cuando alcanzan una raíz sana, penetran su superficie mediante mecanismos ingeniosos, como el uso de enzimas líticas, proteínas que actúan como tijeras microscópicas que les permiten atravesar las defensas de la planta con la facilidad de una fortaleza mal protegida. Además, en frutos en maduración, la acumulación de azúcares y otros cambios fisiológicos pueden disparar la germinación de las esporas, facilitando el inicio de la infección.

Estos patógenos afectan cultivos de gran importancia económica como jitomate, maíz, mango y aguacate. Pero no todo está perdido. Las plantas cuentan con aliados bacterianos que viven en el suelo o se adhieren a sus raíces. Entre ellos destacan especies del género *Bacillus*, como *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* y *B. velezensis*, capaces de producir lipopéptidos cíclicos como iturinas (iturina A, bacilomicina D), fengicinas y surfactinas que inhiben la germinación de esporas y el crecimiento micelial (ver Figura 1). Además, sintetizan compuestos que desactivan las células fúngicas y refuerzan las defensas de la planta mediante resistencia sistémica inducida. Así, lo que a simple vista es ‘tierra’, para estos microorganismos es un campo de batalla donde se decide el futuro del cultivo. Controlar a los hongos fitopatógenos no es tarea fácil. Durante años, la agricultura ha dependido de fungicidas químicos efectivos, pero con altos costos ambientales y sanitarios, ya que pueden contaminar el suelo, afectar la salud de quienes los aplican y

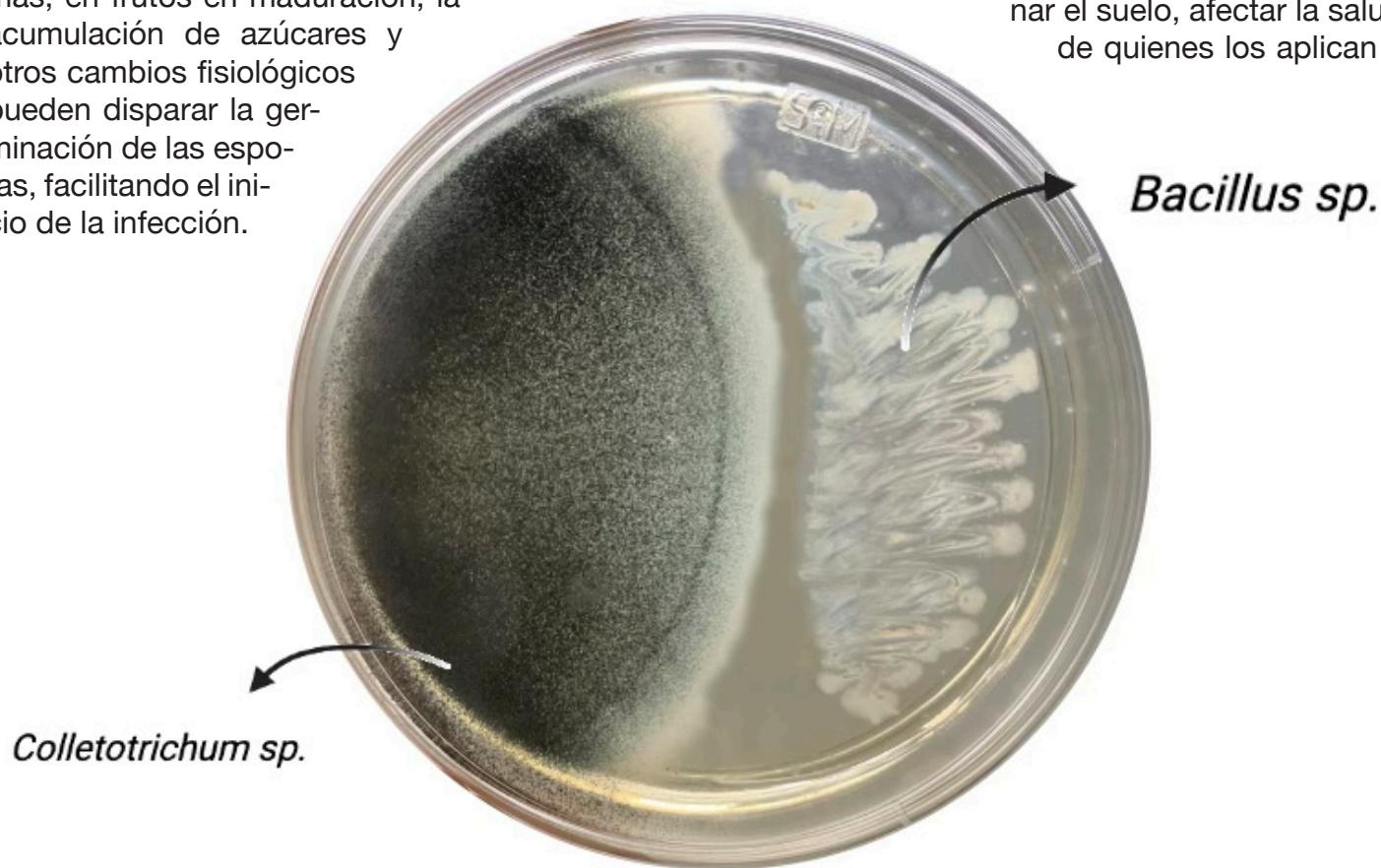


Figura 1. Interacción entre *Bacillus sp.* (derecha) y *Colletotrichum sp.* (izquierda) en medio *in vitro*. Se observa que *Bacillus sp.*, inhibe el crecimiento de *Colletotrichum sp.* Esta supresión indica la actividad antagonista de *Bacillus sp.* hacia el hongo fitopatógeno, sugiriendo su potencial para ser utilizado como agente biocontrolador en la lucha contra enfermedades fúngicas en cultivos.

alterar el equilibrio natural del ecosistema. Hoy sabemos que existen alternativas más sostenibles basadas en el manejo del microbioma y el uso de estos aliados. Para aplicarlas, necesitamos entender mejor cómo viven, cómo atacan y con quién interactúan los patógenos en el complejo mundo microbiano del suelo [1].

El poder oculto de las bacterias

Aunque son invisibles a simple vista, las bacterias cumplen tareas esenciales en la naturaleza. Algunas ayudan a digerir los alimentos, otras depuran aguas, y muchas más fabrican metabolitos antimicrobianos, es decir, moléculas naturales que frenan o eliminan a microbios dañinos. Lejos de ser una rareza, este antagonismo biológico es común. Por ejemplo, las bacterias *Pseudomonas* spp., producen compuestos como fenazinas (p. ej. piocianina), 2,4-diacetilfloroglucinol (DAPG), pirrolnitrina y pioluteorina, capaces de inhibir hongos y bacterias patógenas. En la rizosfera, la delgada capa de suelo que rodea a las raíces, el género *Bacillus* es especialmente frecuente y abundante.

Además, *Bacillus* tiene una estrategia sorprendente, forma endosporas, como un ‘modo de hibernación’, que le permite resistir el calor, la sequía y hasta largos períodos de almacenamiento. Esto hace que sea ideal para usarlo como biopesticida, ayudando a proteger los cultivos de manera eficaz. En conjunto, estas alianzas entre microorganismos muestran que el suelo no es solo tierra, es un ecosistema vibrante y lleno de vida donde las bacterias juegan un papel crucial, protegiendo las plantas de manera natural y sostenible, y ofreciendo una alternativa que puede incluso reemplazar el uso de plaguicidas químicos. La protección de las plantas va más allá de la simple liberación de metabolitos. En las rizosfera, *Bacillus* y otras bacterias forman biopelículas o también llamadas *biofilms*, estos *biofilms* son comunidades adheridas a la raíz e inmersas en una matriz de exopolisacáridos (azúcares), proteínas y ADN extracelular. Esa matriz actúa como barrera física y química frente a los fitopatógenos, ocu-

pan sitios de adhesión y facilita su avance, a la vez que facilita la comunicación por señales químicas entre las bacterias y coordina la producción de metabolitos y reforzando la defensa colectiva.

Dentro de este *biofilm*, las bacterias producen y retienen metabolitos antimicrobianos, que funcionan como barrera química al crear microambientes con concentraciones capaces de inhibir la germinación de esporas y el crecimiento de hongos y bacterias nocivas. Es importante precisar que no son los metabolitos quienes forman la barrera física; es la matriz del *biofilm* la que concentra y potencia su efecto. Diversos estudios reportan que raíces colonizadas por *biofilms* de *Bacillus* presentan significativamente menor incidencia de enfermedades fúngicas que raíces no colonizadas. Este sistema de defensa microbiana, que combina blindaje físico (*biofilm*) y acción química (metabolitos antimicrobianos), ayuda a reducir la dependencia de pesticidas y mejora la salud y el desarrollo del cultivo. Es un ejemplo claro de coevolución planta-microbio, donde las alianzas microscópicas fortalecen la resistencia natural de las plantas [2].

Lejos de requerir laboratorios complejos o insumos costosos, muchas de estas bacterias crecen con sustratos sencillos. Además de azúcares como fuente de carbono (glucosa o sacarosa, o ácidos orgánicos como malato o citrato), necesitan nitrógeno (amonio, nitrato o aminoácidos), fósforo (fosfatos), azufre y micronutrientes (hierro, magnesio, potasio, calcio, manganeso). En el suelo, esos requerimientos se cubren en gran medida con los exudados radiculares, mezclas de azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y otras moléculas, y con los minerales disueltos en la solución del suelo. Además de operar con lo que la planta ofrece en campo, pueden cultivarse en medios económicos (por ejemplo, melazas o subproductos agroindustriales) cuando se producen a escala.

¿Cuál es la estrategia?

El uso preventivo de bacterias del género *Bacillus* como biocontroladores está vincu-

lado al Manejo Integrado de Plagas (MIP), un enfoque que busca reducir el uso de pesticidas químicos y promover métodos naturales para el control de plagas. Este enfoque consiste en aplicar formulados a base de esporas de *Bacillus* (p. ej., *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*) en momentos clave como el tratamiento de semilla, trasplante y riegos tempranos. Así, las bacterias colonizan la rizosfera, forman *biofilms* y producen metabolitos antimicrobianos, los cuales dificultan el establecimiento de hongos fitopatógenos, contribuyendo a una protección eficaz y natural para las plantas. Su efecto es principalmente preventivo; cuando la enfermedad ya está instalada, el control es más limitado.

En campo, *Bacillus* se combina con estrategias tradicionales dentro del MIP: rotación de cultivos, manejo del riego y la ventilación, higiene del equipo, y, cuando se requiere, agroquímicos. Esta combinación permite reducir dosis y frecuencia de fungicidas, retrasar resistencias y mejorar la salud del suelo. Las ventajas para el productor que se generan a partir de esta estrategia son la menor dependencia de pesticidas químicos y mejor perfil ambiental; la estabilidad y facilidad de uso: las esporas toleran almacenamiento y condiciones variables; y, la compatibilidad con esquemas sostenibles (orgánicos o de bajo impacto). Cabe mencionar que el empleo de *Bacillus* no es una “solución única”, sino una pieza clave de una estrategia simple y poderosa cuando se explica y ejecuta dentro de un manejo integrado, ajustado a las condiciones de cada región y cultivo.

¿Dónde se encuentra *Bacillus* bajo tierra?

La rizosfera es el suelo inmediato que rodea a las raíces y su composición química depende en gran medida de la planta (exudados, oxigenación, humedad). No es la capa superficial del suelo, sino el microambiente que se forma alrededor de cada raíz, a la profundidad a la que esta se encuentre. En esta zona activa, *Bacillus* frecuentemente aprovecha azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos liberados por la raíz, se adhiere a su superficie (rizopla-

no), forma *biofilms* y contribuye a la protección vegetal mediante la producción de metabolitos antimicrobianos y otros mecanismos beneficiosos. Varias especies de *Bacillus* también colonizan la parte aérea (filosfera: hojas y tallos) y pueden comportarse como endófitas, es decir, vivir dentro de los tejidos vegetales sin causar daño, ampliando sus oportunidades de interacción y protección [3].

Las armas secretas de *Bacillus*

En el campo de batalla microscópico, *Bacillus* no es un espectador. Detecta señales del entorno (densidad de población, nutrientes, factores de estrés, nutrientes excretadas por las raíces) y activa “fábricas” bioquímicas que producen metabolitos antimicrobianos. Es importante señalar que no todos los compuestos se activan porque haya hongos; varios se sintetizan aún sin presencia de patógenos, regulados por mecanismos de comunicación bacteriana (*quorum sensing*) y por el estado fisiológico de la población. Entre sus “armas” mejor estudiadas están los lipopéptidos cíclicos, como la iturina (Figura 2) (p. ej., iturina A, bacilomicinas, mycosubtilina) y fengicinas, los antifúngicos más potentes de *Bacillus*. Estos, se insertan en la membrana de los hongos, forman poros o la desorganizan, inhiben la germinación de esporas y frenan el crecimiento del

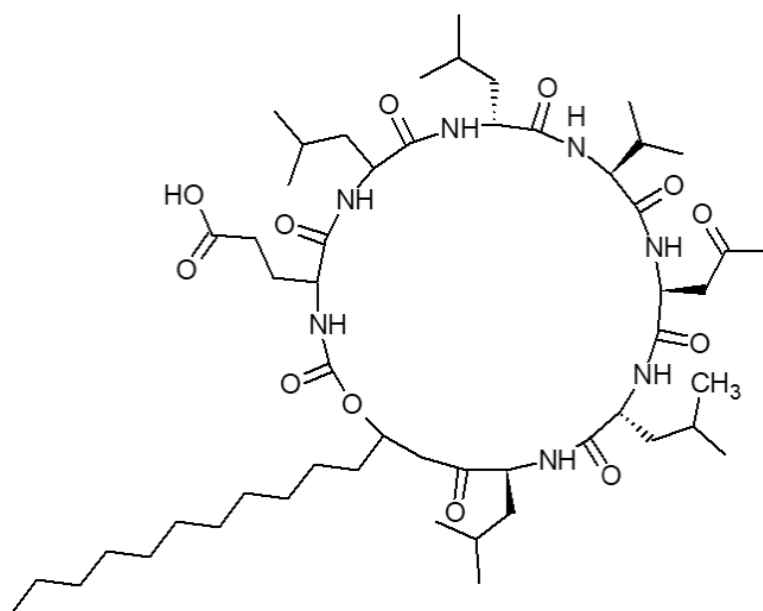


Figura 2. Estructura química de la iturina.

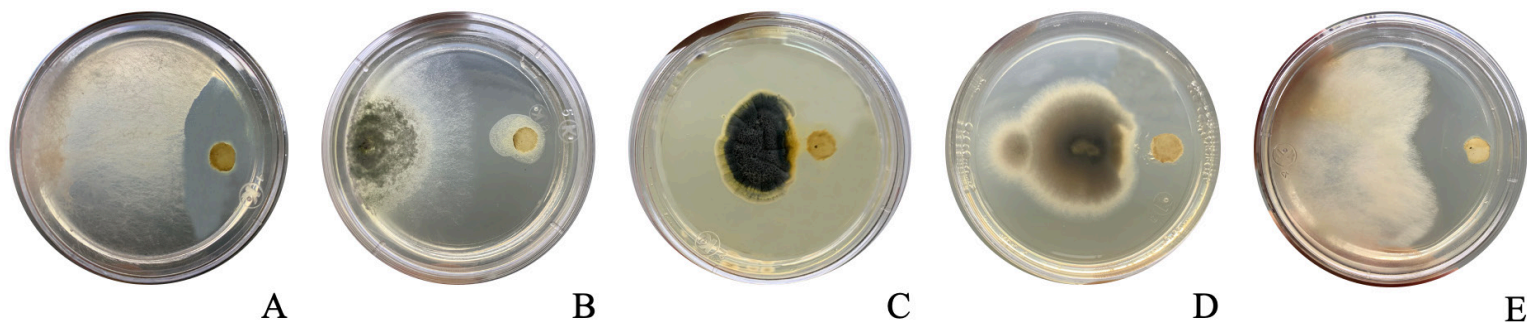


Figura 3. Evaluación in vitro de la actividad antagonista de los metabolitos producidos por *Bacillus* frente a: A) *Fusarium mexicanum*; B) *Fusarium subglutinans*; C) *Colletotrichum* sp.; D) *Fusarium* sp.; E) *Botrytis* sp.

micelio. Su acción explica gran parte del efecto de biocontrol frente a géneros como *Fusarium* sp., *Botrytis* sp. o *Colletotrichum* sp. (Figura 3).

Uno de los compuestos más versátiles de *Bacillus* es la surfactina (Figura 4), un compuesto clave para la movilidad bacteriana (*swarming*), la formación de *biofilms* y la colonización de raíces; además, puede activar defensas de la planta (resistencia inducida). Aunque en algunos casos se han observado efectos sobre ciertos hongos susceptibles, por lo general no es el antifúngico principal. Su papel central

es facilitar el establecimiento de *Bacillus* y potenciar la acción conjunta del consorcio microbiano. La planta, a su vez, eleva sus propias defensas, cerrando el círculo de protección [4].

No solo combate, también nutre

Además de su papel defensivo, *Bacillus* puede actuar como bioestimulante y biofertilizante, promoviendo el crecimiento vegetal, incluso en suelos con baja disponibilidad de fósforo (P). El fósforo es un nutriente clave para la formación de raíces, la fotosíntesis y la pro-

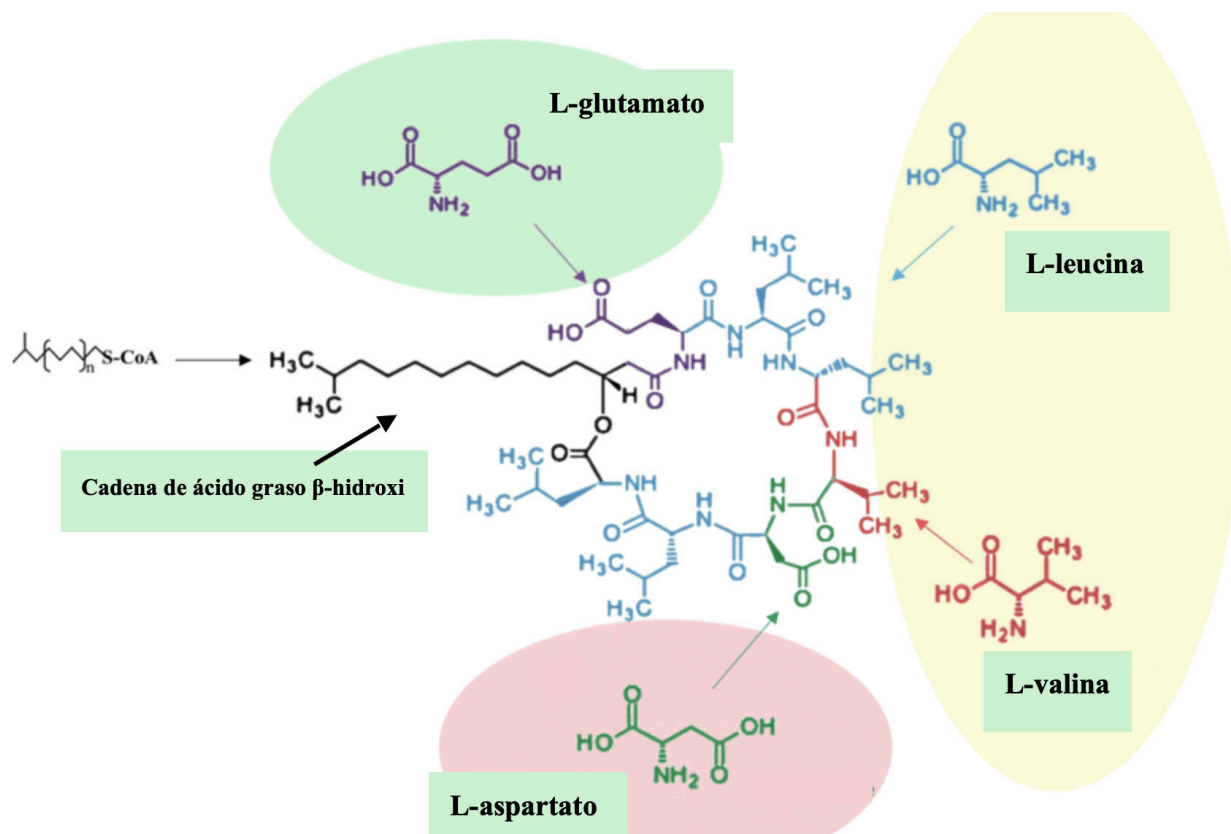


Figura 4. Estructura química de la surfactina.

ducción de energía en la planta. Las especies *Bacillus subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. pumilus* y *B. megaterium*, son especies designadas como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR). En suelos pobres en fósforo activan varios mecanismos complementarios que aumentan la fracción de P disponible y mejoran la exploración de suelo por las raíces:

1. Solubilización de fosfatos minerales. Liberan ácidos orgánicos (por ejemplo, gluconato y citrato) y protones (H⁺) que quiebran enlaces del P con calcio, hierro o aluminio en fosfatos poco solubles (como hidroxapatita o roca fosfórica), volviéndolos asimilables para la planta.
2. Mineralización de fósforo orgánico. Producen fosfatasas (ácidas y alcalinas) y fitasas que transforman el P orgánico del suelo (fitatos y otros compuestos) en fosfato inorgánico, la forma que absorben las raíces.
3. Arquitectura radicular mejorada. Muchas especies de *Bacillus* sintetizan auxinas (como el ácido indolacético, AIA) que estimulan raíces laterales y pelos absorbentes; así, la planta amplía su superficie de absorción justo donde el P está más disponible.
4. Resistencia al estrés. Al formar *biofilms* en la rizosfera, *Bacillus* se adhiere con firmeza a la raíz y creando un ambiente propicio para su desarrollo, además, algunas cepas de estas bacterias producen la enzima ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico) desaminasa, la cual ayuda a modular el etileno (hormona de estrés), favoreciendo el crecimiento radicular en condiciones limitantes.

Así, el resultado es doble, defensa frente a patógenos y mejor nutrición, con plantas más vigorosas y eficientes en el uso de recursos. Por estas razones, *Bacillus* se considera un biofertilizante eficaz y una pieza clave en estrategias agrícolas sostenibles, especialmente cuando el fósforo del suelo está “bloqueado” o es escaso. Cuando estas bacterias liberan auxinas cerca de las raíces, provocan el alar-

gamiento celular, acelerando el crecimiento de tallos y raíces. También inducen la ramificación de la raíz y el desarrollo de estructuras especializadas que permiten a la planta explorar mejor el suelo. El resultado es una planta con raíces más fuertes, eficientes y resilientes. Esto se traduce en un crecimiento más equilibrado, mejor nutrición y mayor tolerancia a condiciones de estrés, como sequía o salinidad.

Estas interacciones revelan una cooperación bioquímica en la que ambas partes se benefician (Figura 5). Una comunicación invisible con un impacto directo en la productividad agrícola. En otras palabras, *Bacillus* no solo protege, también nutre, estimula y fortalece las raíces, en una forma de comunicación bioquímica entre dos formas de vida distintas, pero colaborativas [5].

Basura que cultiva soluciones

Lo que muchas industrias consideran basura, la ciencia lo está convirtiendo en un recurso valioso. Los residuos agroindustriales, que suelen desecharse o causar problemas de contaminación si no se gestionan adecuadamente, están en realidad llenos de nutrientes que ciertas bacterias pueden aprovechar para crecer y producir compuestos útiles. Un ejemplo destacado es la melaza, un subproducto de la industria azucarera con altas concentraciones de azúcares y minerales. Este material se ha propuesto como una fuente rica y subutilizada para emplearse como suplemento en medios de cultivo, demostrando ser eficaz para estimular el crecimiento de bacterias del género *Bacillus* y la producción de metabolitos secundarios. Así, la combinación de residuos agrícolas con bacterias benéficas permite diseñar soluciones de bajo costo que convierten un problema ambiental en una oportunidad para producir más *Bacillus* y, con ello, fortalecer estrategias naturales para mejorar y proteger la salud de los cultivos. Esta estrategia no solo reduce costos, sino que impulsa una agricultura más limpia, sostenible y menos dependiente de químicos, alineándose con los principios de la economía circular y el aprovechamiento responsable de los recursos [6].

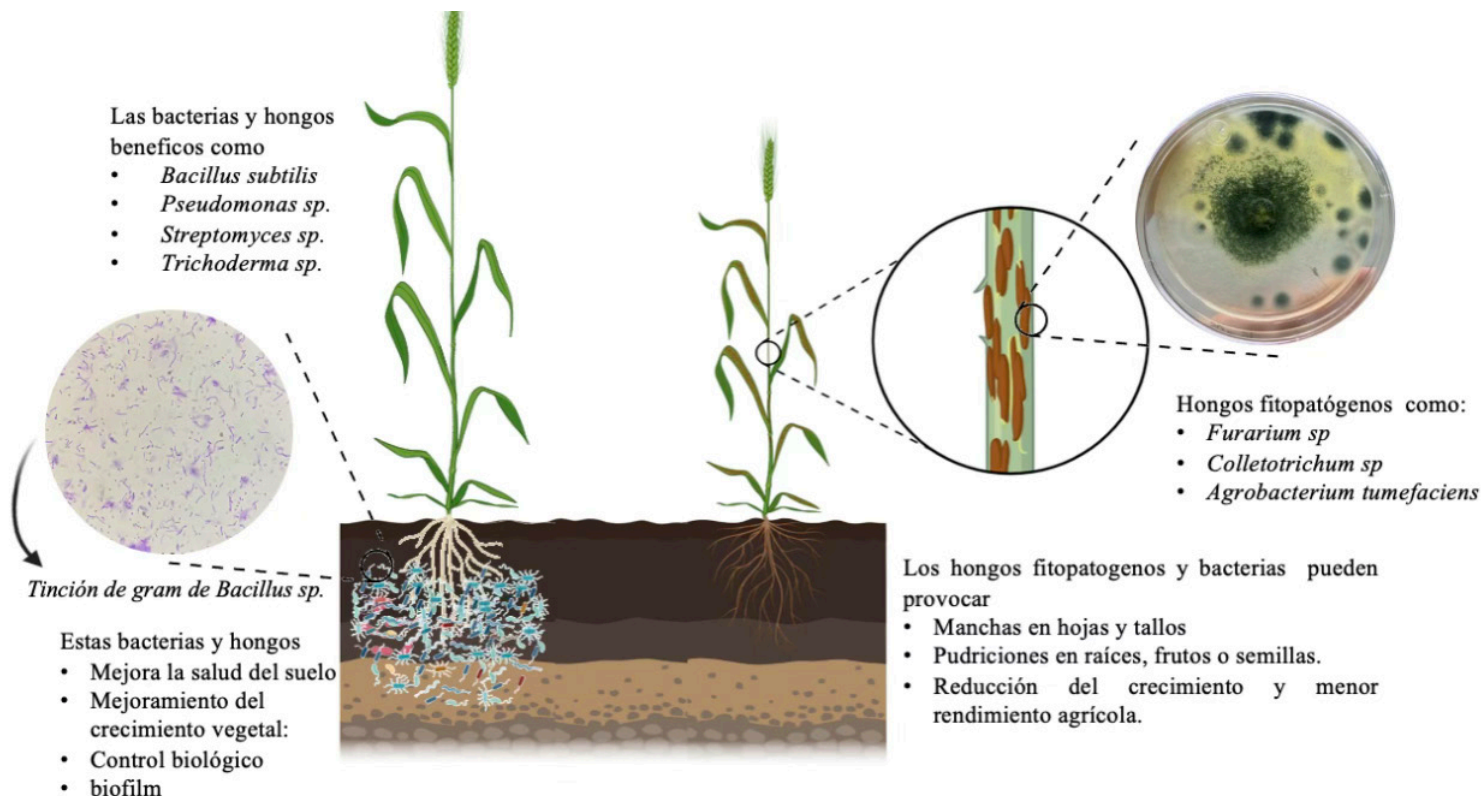


Figura 5. Las bacterias y hongos beneficiosos, como *Bacillus subtilis*, mejoran la salud del suelo y protegen las plantas, mientras que los hongos fitopatógenos, como *Fusarium sp.*, causan daños como manchas en hojas y pudrición en raíces, reduciendo el rendimiento agrícola.

Lo que no se ve, también protege

En el mundo agrícola solemos poner atención a lo que está sobre el suelo, las hojas, los frutos y las plagas visibles. Pero debajo de todo eso, en la oscuridad del suelo, las raíces libran una batalla constante, y no lo hacen solas. Allí, las bacterias trabajan en silencio, protegen, alimentan y equilibran. Descubrir que estas bacterias pueden ayudar a combatir enfermedades en las plantas no solo es una historia de ciencia, sino de transformación. Es la prueba de que incluso los materiales más simples y considerados desechos, pueden convertirse en soluciones valiosas. En un momento en que el futuro de la agricultura depende de prácticas más sustentables, las bacterias, estas aliadas invisibles nos recuerdan que la innovación no siempre consiste en crear algo nuevo, sino en aprender a mirar con otros ojos lo que ya está allí [3]. **iBIO**

Referencias

[1] Kamilova, B.L.F. (2009). Plant-growth-promo-

ting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63, 541–556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>

[2] Flores-Vargas, R.D., O'Hara, G.W. (2006). Isolation and characterization of rhizosphere bacteria with potential for biological control of weeds in vineyards. *Journal of Applied Microbiology*, 100(5), 946–954. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02851.x>

[3] Andrić, S., Meyer, T., Ongena, M. (2020). *Bacillus* responses to plant-associated fungal and bacterial communities. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1350. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01350>

[4] Qiao, J., Borriss, R., Sun, K., et al. (2024). Research advances in the identification of regulatory mechanisms of surfactin production by *Bacillus*: a review. *Microbial Cell Factories*, 23, 100. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02372-7>

[5] Jensen, C.N.G., Pang, J.K.Y., Gottardi, M., et al. (2024). *Bacillus subtilis* promotes plant phosphorus (P) acquisition through P solubilization and stimulation of root and root hair growth. *Physiologia Plantarum*, 176(3). <https://doi.org/10.1111/ppl.14338>

[6] Astudillo, Á., Rubilar, O., Briceño, G., Diez, M.C., Schalchli, H. (2023). Advances in agroindustrial waste as a substrate for obtaining eco-friendly microbial products. *Sustainability*, 15(4), 3467. <https://doi.org/10.3390/su15043467>