

Biotecnología agropecuaria aplicada

Leandris Argentel-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Lucila Perales-Aguilar
Ugur Azizoglu
Editores



Pantanal Editora

2024

Leandris Argentel-Martínez
Ofelda Peñuelas-Rubio
Lucila Perales-Aguilar
Ugur Azizoglu
Editores

Biotecnología agropecuaria aplicada



Pantanal Editora

2024

Copyright© Pantanal Editora

Editor Jefe: Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Ejecutivos: Dr. Jorge González Aguilera y Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diseño: El editor. **Diseño y arte:** el editor. Imágenes de portada y contraportada: Canva.com. **Reseña:** Autor(es), organizador(es) y editor.

Consejo editorial

Grado académico y nombre

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Prof. MSc. Adriana Flávia Neu
Prof. Dra. Allys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Prof. MSc. Aris Verdecia Peña
Prof. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Prof. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Prof. Dra. Denise Silva Nogueira
Prof. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dr. Luciano Façanha Marques
Prof. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Prof. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Prof. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Prof. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Prof. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Prof. Dra. Patrícia Maurer
Prof. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Prof. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
MSc. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Prof. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Institución

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Rede Municipal de Niterói (RJ)
UNMSM (Peru)
UFMT
SED Mato Grosso do Sul
UEMA
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Consejo Científico Técnico
- Esp. Joacir Mário Zuffo Júnior
- Esp. Maurício Amormino Júnior
- Lda. Rosalina Eufrausino Lustosa Zuffo

Hoja de catálogo

Catalogación en publicación
Preparado por Bibliotecario Janaina Ramos – CRB-8/9166

B616

Biotecnología agropecuaria aplicada / Edición de Leandris ArgenteL-Martínez, Ofelda PeñueLas-Rubio, Lucila Perales-Aguilar, Ugur Azizoglu. – Nova Xavantina-MT: Pantanal, 2024.
203p. ; il.

Reserva en PDF

ISBN 978-65-85756-36-5

DOI <https://doi.org/10.46420/9786585756365>

1. Biotecnología en la agricultura. 2. Microorganismos. I. ArgenteL-Martínez, Leandris (Editores). II. PeñueLas-Rubio, Ofelda (Editores). III. Lucila Perales-Aguilar (Editores). IV. Azizoglu, Ugur (Editores). V. Título.

CDD 631.52

Índice del catálogo sistemático

I. Biotecnología en la agricultura



Nuestros libros electrónicos son gratuitos y se permite el acceso público, la descarga y el intercambio, pero solicitamos que se dé el debido crédito a Pantanal Editora y también a los organizadores y autores. Sin embargo, no se permite el uso de libros electrónicos con fines comerciales, salvo autorización expresa de los autores y acuerdo de Pantanal Editora.

Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000.
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil.
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp).
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

Presentación

Sin duda, la biotecnología representa una de las áreas científicas de mayor avance y aplicación en la actualidad. Aun cuando sus inicios fueron hace miles de años, con la obtención de cerveza y queso, gracias al avance científico-tecnológico en las ciencias relacionadas con la biología, se ha potenciado la rama agropecuaria.

En México, considerando que las actividades de producción agrícola y pecuaria son primordiales para el desarrollo del país, existe gran interés de la comunidad científica para buscar alternativas que den solución a los problemas más relevantes que limitan la producción de alimentos.

El presente compendio científico “**Biología agropecuaria aplicada**” aborda temas relevantes del área agropecuaria. Se hace énfasis en el aprovechamiento de microorganismos bacterianos y fúngicos y su potencial uso en los agroecosistemas. Estas aplicaciones con la finalidad de promover prácticas sustentables de producción, desde la promoción del crecimiento vegetal en condiciones ambientales adversas, el biocontrol de fitopatógenos y malezas, así como la biorremediación. También se exploran metodologías novedosas para la obtención de compuestos antioxidantes y antifúngicos. Además, se presentan avances en la elaboración de nuevos alimentos para la producción acuícola, como alternativas para la nutrición efectiva.

Los trabajos aquí presentados constituyen evidencias de los pasos sólidos que dan los diferentes grupos de investigación nacionales e internacionales del área de la biología agropecuaria. Se agradece la participación de los autores que pertenecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI-CONACYT) de los Estados Unidos Mexicanos.

Los Autores

Resumen

Presentación	4
Capítulo 1	6
Perspectivas de la aplicación del microbioma bacteriano de <i>Parkinsonia aculeata</i> en suelos salinos	6
Capítulo 2	17
Microorganismos promotores del crecimiento vegetal y yeso agrícola en el cultivo de uva industrial variedad <i>Cabernet sauvignon</i> , Valle del Yaqui	17
Capítulo 3	26
Efecto de pulsos ultrasónicos en la extracción de compuestos antioxidantes y antifúngicos en <i>Euphorbia prostrata</i> (golondrina)	26
Capítulo 4	36
Evaluación de la sustitución parcial de harina de pescado por harina de <i>Amaranthus hybridus</i> para cultivo de tilapia (<i>Oreochromis aureus</i>)	36
Capítulo 5	48
Potencial del género <i>Pleurotus</i> como agente biorremediador en la eliminación de metales pesados de suelos: un enfoque biotecnológico para la agricultura sostenible	48
Capítulo 6	59
El papel de las bacterias quitinolíticas en interacciones planta-patógeno y su potencial empleo biotecnológico en la agricultura	59
Capítulo 7	71
Avances en el desarrollo de micoherbicidas para el manejo agroecológico de la correhuela (<i>Convolvulus arvensis</i> L.) en la agricultura	71
Capítulo 8	84
Caracterización fisicoquímica parcial de la harina de grillo domestico <i>Acheta domesticus</i> como ingrediente novedoso en formulaciones	84
Capítulo 9	93
El género <i>Bacillus</i> como aliado en la agricultura sostenible	93
Capítulo 10	114
<i>Trichoderma</i> , bioinsumo para la agricultura sustentable y protegida	114
Capítulo 11	135
El papel de la Agrobiotecnología en la Agricultura	135
Capítulo 12	148
Cromatografía: Una técnica esencial en la Biotecnología Agropecuaria	148
Capítulo 13	186
Propagación <i>in vitro</i> de Cactáceas y Agaváceas tolerantes a metales pesados en el suelo	186
Índice Remissivo	202
Editores	203

El género *Bacillus* como aliado en la agricultura sostenible

Recibido en: 20/06/2024

Aprobado en: 26/06/2024

 10.46420/9786585756365cap9

Alejandro Miguel Figueroa-López^{1*} 

Rufina Hernández Martínez² 

Daniel Miramón Ortiz³ 

Edgardo López González³ 

Ernesto Uriel Cantú Soto¹ 

RESUMEN

Las prácticas agrícolas de actualidad demandan un comportamiento sostenible, ya que el incremento en la población mundial demanda un incremento en la producción de productos básicos. Una estrategia prometedora es el uso de bacterias del género *Bacillus*, este diverso grupo bacteriano ha mostrado una amplia gama de aplicaciones en la agricultura. Diversas especies han sido utilizadas como alternativas a los fertilizantes químicos siendo alternativas viables a los fertilizantes y los pesticidas sintéticos. Una característica importante de estas especies es la formación de endosporas lo que las hace muy apropiadas para el desarrollo de formulaciones para uso agrícola. Los *Bacillus* han demostrado muchos beneficios en sus aplicaciones, entre ellas la protección contra patógenos e insectos y así como promover el crecimiento de las plantas mediante su fitoestimulación. Estas especies han revolucionado la agricultura creando a base de ellas soluciones sostenibles para la gestión de enfermedades y plagas.

INTRODUCCIÓN

En el año 2022, la población mundial alcanzó los 8000 millones de personas, y en tan solo doce años la población mundial se incrementó de 7000 a 8000 millones de habitantes, posiblemente dentro de 15 años se incremente a los 9000 millones (United Nations, 2024). Proveer alimentos para la población mundial creciente será todo un reto para este siglo, la cual tendrá que ser de forma sostenible y amigable con el medio ambiente (Etesami et al., 2023).

Uno de los principales retos para el siglo XXI será el desarrollo de una agricultura sostenible y respetuosa con el medio ambiente que logre proveer alimentos a una creciente población humana venidera. Los métodos de producción agrícola en la actualidad todavía dependen en gran medida del uso

¹ Instituto Tecnológico de Sonora, Cajeme Sonora, México, CP: 85000.

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. CP: 22860.

³ Laboratorio de Investigación y Análisis de Microorganismos de Grupo Molina, Hermosillo Sonora, México. CP: 83190.

* Autor(a) correspondiente: alejandromiguel85@gmail.com

de pesticidas y fertilizantes químicos, esto genera problemas en el ambiente (Berg, 2009). Además, los patógenos vegetales emergentes, reemergentes y endémicos siguen desafiando nuestra capacidad para salvaguardar el crecimiento y la salud de las plantas en todo el mundo (Miller et al., 2009). Los tratamientos químicos han demostrado que sólo son eficaces durante un breve periodo de tiempo en la temporada de cultivo. Por otro lado, los compuestos antimicrobianos producidos por bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) han demostrado ser bastante eficaces para combatir plagas, patógenos, etc. y ser efectivos como agentes de biocontrol. Estas son un grupo de bacterias beneficiosas que viven en el suelo o colonizan la rizósfera, la filósfera o el interior del tejido vegetal (endófitos). Por lo tanto, el control biológico se han convertido en una estrategia importante para la sostenibilidad de los cultivos, y así mantenerlos libres de enfermedades que, en última instancia, faciliten la producción sostenible (Andrić et al., 2020; Zheng et al., 2013; Nagórska et al., 2007).

Recientemente, el uso de BPCV con actividad de biocontrol ha adquirido importancia en la agricultura, sobre todo aquellos que presentan actividad protectora frente a patógenos vegetales de importancia económica, lo que representa una alternativa prometedora frente a los agroquímicos (Andrić et al., 2020; Köhl et al., 2019). Las bacterias y hongos benéficos de vida libre que se encuentran en el suelo o aquellos que actúan como endófitos pueden promover el crecimiento vegetal, algunos poseen la capacidad de proteger a la planta contra enfermedades y factores abióticos favoreciendo su desarrollo (Tonelli et al., 2010). Estos microorganismos se encuentran en la rizosfera de las plantas, el sitio más activo metabólicamente debido a los exudados radicales. La rizósfera es la porción de suelo inmediato a la raíz, y aquí las plantas depositan un porcentaje de sus metabolitos fotosintéticos (entre el 10 y el 40%) enriqueciendo el suelo con nutrientes, aminoácidos y moléculas energéticas orgánicas como los carbohidratos (Vetterlein et al., 2020). Esta fertilización tiene una influencia significativa en la microbiota del suelo inmediato a la raíz. Con esto las plantas pueden ser capaces de modular los microorganismos que interactúan con ellas mediante la composición de los exudados (Nuccio et al., 2020). Cuando las plantas exudan compuestos similares, pueden atraer a ciertos grupos de microorganismos en común, a estos grupos de microorganismos que persiste en diferentes plantas se denomina microbioma central (core microbiome). Las plantas pueden exudar compuestos específicos de cada especie, esto influye a ciertos grupos de microorganismos que varían del microbioma central, formando interacciones específicas (Orozco-Mosqueda et al., 2022). Estas interacciones pueden ocurrir de diferentes formas, estimulando su crecimiento; haciendo disponible los nutrientes en el suelo; fijando nitrógeno atmosférico; suprimiendo patógenos y protegiendo las plantas de diversas enfermedades; y aumentando la tolerancia de las plantas a factores ambientales agrestes (Etesami et al., 2023; Etesami, 2020a; Egamberdieva et al., 2017).

Entre los microorganismos que se pueden asociar a las plantas y tener un efecto positivo en su crecimiento se han reportado especies de los siguientes géneros: *Acetobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, and *Serratia*. Siendo los géneros *Bacillus* y

Pseudomonas las comunidades más predominantes (Radhakrishnan et al., 2017; Figueroa-López et al., 2016) y algunas de las BPCV de estos géneros se han comercializado gracias a su supervivencia en una amplia gama de entornos bióticos y abióticos.

Bacillus spp. son un género de bacterias Gram positivas que se encuentran distribuidas ampliamente en la naturaleza y se han aislado de en una gran diversidad de nichos en el ambiente. De ellas se han obtenido diversos productos entre los cuales destacan algunos en el ámbito medicinal, industrial y en la agricultura (Radhakrishnan et al., 2017). El potencial uso que se la ha dado a los microorganismos pertenecientes a este género incluyen el desarrollo de productos fitosanitarios y fertilizantes naturales aplicados en las áreas de la silvicultura, horticultura y agricultura (Saxena et al., 2020; Passari et al., 2018).

Dentro de la diversidad tan grande que existe en este género de microorganismos, se ha destacado por desempeñar un papel muy importante en la salud de las plantas. Los *Bacillus* como bacterias benéficas han demostrado ser verdaderos aliados en la agricultura sostenible. En este capítulo, se explora las capacidades promotoras de crecimiento vegetal y el impacto que han tenido en la agricultura.

Origen, Características y Adaptabilidad de los Bacillus

El género *Bacillus* se fue creado en el 1872 por Ferdinand Julius Cohn (Skerman et al., 1980) y dentro de este género se encuentran agrupadas 110 especies y un total 633 incluidas las subespecies (<https://lpsn.dsmz.de/genus/bacillus>). Las características principales de este género son su forma particular de bastón, son Gram positivas, aerobias o anaerobias facultativas y catalasa positivas (Miljaković et al., 2020; Whitman, 2010). Otra característica que poseen es la formación de endosporas, y esto ha obtenido especial atención de los científicos en el mundo. Estas estructuras se encuentran dentro de las más resistentes que se conocen, pueden estar latentes por periodos de tiempo muy extensos sin nutrientes (Riley et al., 2020). Estas estructuras se caracterizan por otorgarles a estas especies una resiliencia muy alta a condiciones adversas. Especies de este género, se adaptan a condiciones adversas en diversos hábitats son extremadamente resistentes a la radiación ultravioleta, el calor, la desecación, la radiación ionizante y muchas sustancias químicas tóxicas; se han usado tratamientos térmicos (80°C) para enriquecer *Bacillus* formadores de endosporas. Pueden desarrollarse en medios nutritivos en condiciones aerobias o anaerobias facultativas, y sólo unas pocas son anaerobias estrictas; presentan turbidez a las pocas horas de crecimiento en medios líquidos. Se pueden diferenciar al usar condiciones de crecimiento (nutrientes y temperatura) favoreciendo ciertas especies (Liu et al., 2023; Miljaković et al., 2020).

El suelo es una fuente común para la obtención de bacilos, existen algunas especies reportadas como patogénicas a los seres humanos, se les ha encontrado contaminando alimentos de consumo mediante la producción de toxinas termoestables, como por ejemplo *Bacillus cereus* y *Bacillus anthracis*, la

mayoría de los *Bacillus* spp. no son patógenos para el ser humano ni otros animales, y se consideran seguros para su uso en el medio ambiente (Liu et al., 2023; Bhattacharyya et al., 2016).

Del total de las poblaciones bacterianas existentes en el suelo, *Bacillus* spp. representa hasta el 95% de las bacterias Gram positivas, y de igual forma tienen mayor representación dentro de los grupos de bacterias endófitas ya reportadas (Miljaković et al., 2020).

Los Bacillus en la adquisición de nutrientes y salud del suelo.

Aquí exploraremos el papel crucial de los *Bacillus* en la salud del suelo. Desde su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico hasta su habilidad para solubilizar algunos elementos esenciales para el desarrollo de las plantas, veremos cómo estas bacterias contribuyen a la fertilidad del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

- **Fijación de Nitrógeno (N)**

El nitrógeno es necesario para la producción y desarrollo para las plantas. Este elemento forma parte de la molécula de clorofila (indispensable para la fotosíntesis), de los aminoácidos y por ende de las proteínas (Zayed et al., 2023). Otra función extremadamente importante es que forma parte de los ácidos nucleicos y de moléculas almacenadoras de energía en la célula como el ATP. Aunque este elemento se encuentra en la atmósfera en grandes cantidades no puede ser utilizado por las plantas, se necesitan formas asimilables de este elemento como el Amonio (NH_4^+), Amoniaco (NH_3), Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-), Urea [$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$] (Wagner, 2011). Otra forma de como las plantas pueden asimilar este elemento es mediante la fijación biológica del nitrógeno y solo unos pocos de procariontes pueden realizar este proceso (Wagner, 2011). Por lo tanto, la fijación de este elemento es la transformación del N_2 atmosférico en formas asimilables para la planta proporcionando una fuente de nitrógeno suficiente para las plantas.

Los microorganismos capaces de fijar nitrógeno pueden tener un comportamiento simbiótico o ser de vida libre. Varias BPCV, entre ellas especies de *Bacillus*, pueden lograr una reducción del uso de fertilizantes químicos y así incrementar el rendimiento y el crecimiento de las plantas mediante la fijación biológica de nitrógeno. Se calcula que esta fijación de nitrógeno puede ser del 12 al 70% en cultivos agrícolas y está mediada por rizobacterias (Miljaković et al., 2020). Se sabe que diversas especies de *Bacillus*, como *B. aerophilus*, *B. altitudinis*, *B. aquimaris*, *B. aryabhatai*, *B. brevis*, *B. cereus*, *B. circulans*, *B. firmus*, *B. licheniformis*, *B. megaterium*, *B. mycoides*, *B. pumilus*, *B. rhizosphaerae*, *B. safensis*, *B. subterraneus*, *B. subtilis*, *B. vietnamensis* fijan nitrógeno atmosférico (Etesami et al., 2023; Saxena et al., 2020; Yousuf et al., 2017; Ambrosini et al., 2016; X. Ding et al., 2015; Ji et al., 2014). La fijación de este elemento en organismos de vida libre se logra mediante la acción de una enzima llamada nitrogenasa. Algunos estudios han mostrado que los microorganismos fijadores de nitrógeno poseen el gen *nifH*, este gen ha sido reportado

en varias especies de *Bacillus* como lo son *B. cereus*, *B. mycooides*, *B. aryabhatai*, *B. megaterium* y *B. subtilis* mediante ensayos de reducción de acetileno (Gupta et al., 2021; Ambrosini et al., 2016; Ding et al., 2005).

Algunos *Bacillus* han demostrado ser muy eficientes para fijar nitrógeno, *B. megaterium* reportada como fijadora de nitrógeno tuvo un efecto positivo en los parámetro de rendimiento en trigo (Aslam et al., 2016); la inoculación de *B. rhizosphaerae* incrementó el peso seco de plantas de caña (Madhaiyan et al., 2011); las semillas de arroz tratadas con *B. aryabhatai*, *B. megaterium* y *B. subtilis* mostraron un mejor crecimiento de la planta, mayor altura, peso seco y efectos antagonistas contra los hongos patógenos (Ji et al., 2014). Los *Bacillus* son microorganismos que pueden fijar nitrógeno atmosférico ayudando a incrementar la deficiencia de nitrógeno en el suelo.

- **Disponibilidad de Fósforo (P)**

El fósforo (P), es un elemento que en su mayoría no se encuentra disponible para las plantas. Este nutriente necesita ser transformado a una forma soluble en la que las plantas pueden absorberlo. La baja disponibilidad de este nutriente obstaculiza el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Etesami et al., 2023; Etesami, 2020b). Las funciones biológicas de este elemento son clave para el desarrollo de las plantas; está involucrado en reacciones de transferencia de energía a nivel bioquímico, participa en el desarrollo y elongación de las raíces, está involucrado en la resistencia mecánica de las raíces y tallos, la formación de las flores y las semillas, en la fotosíntesis, en la fijación de nitrógeno en las leguminosas, en la resistencia a las enfermedades, en el aprovechamiento del almidón y además es un elemento clave en la estructura de los ácidos nucleicos, biomoléculas responsables de los rasgos hereditarios en las plantas (Khan et al., 2023). La disponibilidad del P en suelo es limitada, H_2PO_4 y $H_2PO_4^{2-}$ son las formas en las que las plantas lo pueden absorber, sin embargo, más del 80% del fosforo que se encuentra en el suelo no está disponible (Etesami et al., 2023; Saeid et al., 2018).

Existen diversas especies de *Bacillus* con la capacidad de solubilizar fósforo en el suelo, *B. circulans*, *B. chitinolyticus*, *B. coagulans*, *B. cereus*, *B. fusiformis*, *B. pulvifaciens*, *B. pumilus*, *B. megaterium*, *B. mycooides*, *B. simplex*, *B. sircalmous* y *B. subtilis* (Sharma et al., 2013). Siendo las bacterias con más representación en la rizosfera *B. subtilis*, *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *B. pumilus* y *B. megaterium* (Saeid et al., 2018). Se mencionan en la literatura que existen algunos mecanismos por los cuales las bacterias del suelo pueden hacer biodisponible el fosforo en formas solubles, estos pueden involucrar la quelación, reacciones óxido reducción y principalmente la producción de ácidos orgánicos (solubilización de compuestos insolubles de fosfato inorgánico como fosfato tricálcico, fosfato dicálcico, hidroxapatita y roca fosfática), y también la producción de fosfatasas (para la mineralización del fósforo orgánico) (Ibarra-Galeana et al., 2017). Entre los ácidos orgánicos destacan, los ácidos láctico, propiónico, glucónico, isobutírico, acético, isocaproico, caproico, heptanoico y succínico (Saeid et al., 2018; Cheng et al., 2017; Otieno et al., 2015).

Las fosfatasas y las fitasas son dos grupos de enzimas que pueden catalizar la conversión de las formas orgánicas a formas inorgánicas de fosfatos. *B. flexus* y *B. megaterium* mostraron actividad fosfatasa

en diversas fuentes de fosfato (Ibarra-Galeana et al., 2017). Especies como *B. subtilis*, *B. licheniformis* y *B. laevolacticus* pueden producir fitasas (Farhat et al., 2008). *Bacillus* spp. pueden solubilizar fosfato en diversos sustratos, como cenizas, espinas de pescado, espinas de ave, fosfato de aluminio, fosfato de hierro y fosfato tricálcico, y esta mineralización tiene una alta correlación con la producción de ácidos orgánicos (Saeid et al., 2018; Tao et al., 2008). Los *Bacillus* que solubilizan fosfato están involucrados con un efecto positivo en parámetro de crecimiento vegetativo, germinación, rendimiento, contenido de aminoácidos, clorofila, glucosa, sacarosa, fructosa, actividades fotosintéticas y acumulación de P en diversos cultivos (Zaheer et al., 2019; Bahadir et al., 2018; Garcia-Lopez & Delgado, 2016; Mehta et al., 2015).

- **Disponibilidad de Potasio (K)**

El potasio es el tercer elemento más importante para las plantas después del Nitrógeno y el Fosforo y más del 98% de sus formas no están disponibles para las plantas. Al parecer las bacterias pueden hacer formas solubles de K mediante la producción de ácidos orgánicos (Saxena et al., 2020). Otra vía que pueden usar los *Bacillus* para solubilizar K, es la producción de polisacáridos extracelulares para disolver los minerales de K y hacerlo soluble en el suelo. Estos mecanismos ya han sido reportados en varias especies de *Bacillus* como *B. pseudomycooides*, *B. firmus*, *B. mycooides*, *B. megaterium*, *B. decolorationis*, *B. edaphicus*, *B. horikoshii*, *B. circulans*, *B. subtilis*, *B. velezensis*, *B. cereus*, *B. coagulans* y *B. licheniformis* (Pramanik et al., 2020; Saha et al., 2016; Verma et al., 2015). *B. licheniformis* puede solubilizar K y producir fitohormonas (AIA=ácido indolacético), siendo capaz de soportar ambientes ácidos y alcalinos mostrando ser un efectivo bioinoculante (Saha et al., 2016). Las bacterias solubilizadoras de K suelen aplicarse con una forma mineral como los residuos de biotita (Biotita, es un grupo de minerales filosilicatos de Hierro y Magnesio, del grupo de las micas). Recientemente, *B. pseudomycooides*, fue aislada de suelos de cultivo de té del noreste de la India y se descubrió que aumentaba la disponibilidad de potasio en el suelo y la absorción en las plantas de té cuando se inoculaba con residuos de biotita (Pramanik et al., 2020). De igual forma se ha observado que *Bacillus* spp. pueden mitigar la deficiencia de K al disolver minerales ricos en éste, ayudando a incrementar los niveles de K en la planta y el redimiendo de los cultivos (Pramanik et al., 2020; Shakeel et al., 2015).

- **Disponibilidad de Hierro (Fe)**

La disponibilidad de hierro al igual que los otros elementos mencionados anteriormente, se encuentra limitada en el suelo, el Fe puede formar compuestos que no están en su forma disponible para las plantas y puede llegar a ser una limitante en la producción agrícola (Morrissey & Guerinot, 2009). Las biomoléculas que las bacterias producen para quelar Hierro se llama sideróforos. En cuanto a *Bacillus* spp. está documentado que producen moléculas del tipo hidroxamato y catecolato; entre ellos se encuentran sideróforos como la bacillibactina, la petrobactina la esquizoquina la pioverdina y la pioquelina (Khan et al., 2016). Estas moléculas actúan como quelantes de metales con bajo peso

molecular y una alta afinidad por el Hierro férrico, éstos se producen en condiciones limitantes de Hierro; se sabe que algunas BPCV producen varios sideróforos e incrementan el Fe disponible para la plantas (Singh et al., 2020).

Diversas especies de *Bacillus* están reportadas como productoras de sideróforos, entre ellos *B. subtilis*, *B. pumilus*, *B. velezensis*, *B. mojavensis*, *B. licheniformis*, *B. thuringiensis*, *B. halodenitrificans*, *B. cereus*, *B. anthracis* y *B. atropbaeus* (Etesami et al., 2023; Goswami et al., 2016; Ramadoss et al., 2013; Zawadzka et al., 2009). La versatilidad de los sideróforos de *Bacillus* es notable en sus múltiples aplicaciones agrícolas: pueden servir como promotores de crecimiento de las plantas, mejorando la absorción y asimilación de nutrientes, así como actuar como agentes de biocontrol, suprimiendo el crecimiento de hongos patógenos.

Estudios recientes se han enfocado en el papel que juegan los sideróforos de *Bacillus* para promover el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, se ha demostrado que *B. subtilis* produce una amplia gama de sideróforos, como la bacillibactina y la petrobactina, que no solo mejoran la disponibilidad de hierro, sino que también presentan efectos antagonistas contra diversos fitopatógenos (Timofeeva et al., 2022; Roy, 2020; Sah & Singh, 2015). Se ha descubierto que determinados sideróforos de *Bacillus* inhiben el crecimiento de hongos y bacterias patógenos de las plantas, reduciendo así la incidencia de enfermedades vegetales y mejorando el rendimiento de los cultivos (Hong et al., 2022). La utilización de sideróforos de *Bacillus* o de las cepas bacterianas que los producen son una vía prometedora para las prácticas agrícolas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

- **Disponibilidad de Zinc (Zn)**

La deficiencia de micronutrientes, particularmente el zinc, es de preocupación mundial con gran impacto en la productividad de los cultivos (Ishimaru et al., 2011). Una posible solución a la deficiencia de Zn en las plantas es el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal, como las especies de *Bacillus*, que tienen la capacidad de solubilizar el Zn y disponerlo a las plantas para su absorción. Estas bacterias pueden aumentar la biodisponibilidad del Zn en el suelo, permitiendo a las plantas adquirir y utilizar mejor este nutriente esencial (Sindhu et al., 2019).

Se sabe que las bacterias solubilizadoras de Zn producen varios tipos de ácidos orgánicos e inorgánicos y compuestos quelantes, a través de los cuales se ponen a disposición de las plantas formas complejas de zinc no disponibles (Kumawat et al., 2017). Algunos *Bacillus* reportados con esta capacidad son *B. aryabhatai*, *B. subtilis*, *B. thuringiensis*, *B. cereus*, *B. licheniformis*, *B. megaterium* y *B. tequilensi* (Costerousse Benjamin et al., 2017; Shakeel et al., 2015; D. Singh et al., 2017). *B. aryabhatai* logró promover el crecimiento de trigo al ser utilizada como bionoculante además de incrementar la contracción y la movilización de diferentes sales de Zn (Ramesh et al., 2014). *B. subtilis* logró incrementar la contracción de Zn en granos de trigo hasta dos veces comparado con su control (Singh et al., 2017).

El uso de microorganismos solubilizadores de Zn pueden ser muy beneficioso en comparación con el uso de fertilizantes de Zn tradicionales, que pueden ser costosos, problemáticos para el medio ambiente y transformarse rápidamente en formas insolubles. Además, pueden mejorar el desarrollo de los cultivos y aumentar el rendimiento en los cultivos de forma sostenible.

***Bacillus* y la Protección de las Plantas**

Los *Bacillus* no solo promueven el crecimiento de las plantas, sino que también las protegen contra patógenos. En este capítulo, se discutirá cómo estos microorganismos producen una variedad de compuestos antimicrobianos que pueden incluir antibióticos, enzimas que degradan la pared celular y otras sustancias bioactivas; ayudando a la defensa de las plantas y a combatir enfermedades.

- **Producción de Compuestos Antimicrobianos**

Las bacterias pertenecientes al género *Bacillus* han sido reconocidas por su habilidad para producir una variedad de compuestos antimicrobianos que son efectivos contra un amplio rango de microorganismos patógenos (Fickers, 2012). Los metabolitos secundarios descritos con actividad antibacteriana y antifúngica son los lipopéptidos del tipo biosurfactante y existen tres principales familias: surfactinas, iturinas y fengicinas (Guzman et al., 2020; Dimkić et al., 2017). Los biosurfactantes son moléculas anfipáticas que pueden disrumpir la membrana de los microorganismos, permitiendo la lisis celular y su muerte (Guzman et al., 2020). *Bacillus* spp. tienen el potencial genómico para producir más de 2 docenas de antibióticos con un arreglo impresionante de diversas estructuras y se estima que entre el 4 y 5% del genoma de *B. subtilis* se emplea para la producción de antibióticos y parte de estos está destinada para la producción de lipopéptidos (biosurfactantes) (Penha et al., 2020).

Las iturinas presentan la mayor efectividad contra un amplio espectro de patógenos fúngicos (Penha et al., 2020). Las iturinas producidas por *B. amyloliquefaciens* PGPBacCA1 fueron capaces de inhibir la germinación de las clamidosporas y esclerocios de *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Sclerotinia* spp., y *Rhizopus* spp., patógenos comunes presentes en semilla de *Phaseolus vulgaris* (Torres et al., 2017). Las surfactinas producidas por *B. subtilis* fueron capaces de reducir la severidad de la enfermedad del patógeno *Zymoseptoria tritici* mediante aplicaciones foliares (Mejri et al., 2018). *B. pumilus* W-7 presentó un efecto sinérgico en el control e inducción de sistema de defensa de la planta con la producción de surfactinas y fengicinas contra el patógeno de papa *Phytophthora infestans* (Y. Wang et al., 2020). Las surfactinas de *B. subtilis* en combinación de otros lipopéptidos, inhibieron un 60.9% el crecimiento de *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* y en estudios de invernadero redujo la incidencia de la enfermedad en un 56.5% (Yang et al., 2018). Las fengicinas producidas por *B. subtilis* mostraron una reducción de la enfermedad causada por *Fusarium graminearum* en ensayos de laboratorio y campo en plantas de maíz (Chan et al., 2009). El uso de bacterias con capacidad de producir lipopéptidos con actividad antifúngica

presenta un enfoque sostenible para el medio ambiente en el manejo de enfermedades fúngicas en los cultivos. Al aprovechar la capacidad de estos microorganismos se puede mitigar el uso de fungicidas químicos y promover la salud y productividad de los cultivos.

- **Enzimas líticas**

Debido a la gran diversidad metabólica que poseen las bacterias del género *Bacillus*, pueden producir además de los lipopéptidos antifúngicos, enzimas líticas. Estas actúan en la degradación de componentes de la célula fúngica como lo son la quitina, proteínas y β -glucanos; y esta actividad está dada por la producción de quitinasas, proteasas y β -glucanasas (Saxena et al., 2020).

Algunos bacilos tienen la capacidad de producir estas enzimas, entre ellos, *B. subtilis*, *B. thuringiensis*, *B. licheniformis*, *B. safensis*, *B. pumilus*, *B. velezensis* and *B. cereus* (Berini et al., 2018; Huang et al., 2017). La acción de estas enzimas es principalmente la afectación de la pared celular de los patógenos, está reportado la acción conjunta de enzimas proteasas, quitinasas y glucanasas pueden ser las responsables de la degradación de hifas, como es el caso de *B. turigiensis* contra *Sclerotinia minor* (Shrestha et al., 2015). *B. velezensis* se reportó como el responsable de afectar el desarrollo del patógeno *Coletotrichium gloeosporioides* mediante la producción de proteasas y glucanasas (Huang et al., 2017). En los últimos años, el género *Bacillus* se ha revelado como una fuente prometedora de enzimas líticas y compuestos antimicrobianos con un importante potencial de aplicación en entornos agrícolas.

- **Compuestos volátiles**

En los últimos años, los compuestos orgánicos volátiles producidos por los *Bacillus* han recibido especial atención (Chen et al., 2020). Estos son compuestos de bajo peso molecular que constan de hasta 20 átomos de carbono con una fracción lipofílica, alta presión de vapor y bajo punto de ebullición (Saxena et al., 2020). Esta reportado que varias especies de este género los producen, entre ellos *B. pumilus* and *B. thuringiensis*, *B. velezensis*, *B. amyloliquefaciens* y *B. subtilis* (Wu et al., 2019; Gao et al., 2018; Tahir et al., 2017; Zheng et al., 2013).

El perfil de algunos compuestos volátiles producidos por *Bacillus* spp. son pertenecientes a cetonas, alcoholes, aldehídos, pirazinas, ácidos, ésteres, piridinas y benceno (Li et al., 2015). Estos compuestos presentan actividad antifúngica como lo son las piranzinas, 4-cloro-3 metil, fenol-2-4-bis y bezotiazol producidos por *B. velezensis* contra *Alternaria solani* y *Botrytis cinerea* (Gao et al., 2018). Compuesto volátiles de *B. velezensis* FZB42 y *B. atrophaeus* mostraron un efecto inhibitorio contra *R. solanacearum* (Li et al., 2015).

B. subtilis CF-3 capaz de producir 2,4-ditert-butiltiofenol y el benzotiazol, mostró un fuerte efecto inhibitorio contra *Monilinia fructicola* y *C. gloeosporioides* debido a estos compuestos (Gao et al., 2018). Massawe et al. (2018) reportan que tres especies de *Bacillus* producen compuestos volátiles con efecto inhibitorio contra *S. sclerotiorum*. Estos compuestos volátiles desempeñan papeles cruciales en las interacciones ecológicas y las aplicaciones biotecnológicas de las especies de *Bacillus*.

- **Inducción del Sistema de Defensa de las Plantas**

Las plantas son organismos sésiles, y por ende se encuentran constantemente expuestas a diversas fuentes de estrés biótico y abiótico afectando su desarrollo y productividad. Para contrarrestar estos efectos negativos las plantas han evolucionado de tal forma que adaptaron mecanismos de defensa, entre ellos está la inducción de resistencia sistémica, un sistema en el cual las especies de *Bacillus* pueden inducir y preparar a la planta para defenderse contra una amplia variedad de organismos fitopatógenos (Radhakrishnan et al., 2017).

Existen dos sistemas de respuesta a patógenos en plantas, la resistencia sistémica adquirida (SAR), la cual se activa mediante la interacción de la planta con algún patógeno o plaga en una infección localizada, y la resistencia sistémica inducida (ISR), mediada por la inducción debido a agentes externos antes de la infección (Li et al., 2017; Miljaković et al., 2020). Por lo general la ISR es desencadenada por los compuestos que producen los microorganismos que activan vías de señalización dependientes del jasmonato (JA) y etileno (ET) (Choudhary & Johri, 2009). Y la SAR está mediada por la vía de respuesta dependiente de ácido salicílico (SA), SAR también puede activar genes relacionados con defensa asociados con la producción de proteínas de patogénesis (PR) mientras que ISR se caracteriza por no activar este tipo de genes (Niu et al., 2016).

Varias especies de *Bacillus* han sido reportadas como inductoras de resistencia en plantas otorgando protección contra diversidad enfermedades, entre ellos se encuentran *B. amyloliquefaciens*, *B. cereus*, *B. subtilis*, *B. simplex* y *B. megaterium* (Miljaković et al., 2020). *B. amyloliquefaciens* indujo resistencia dependiente de la vía de SA en plantas de tomate, redujo la incidencia del virus de la marchitez del tomate y provocó un retardo en la acumulación del Virus Y de la papa (Beris et al., 2018). *B. simplex*, provocó una activación temprana del sistema de defensa en plantas de tabaco incrementado la producción de especies reactivas de oxígeno y deposición de callosa mediante las vías de señalización de JA, ET y SA (Miao et al., 2018). *B. cereus* provocó una reducción de la incidencia de la enfermedad causada por *B. cinerea* a través de la activación de ISR (Niu et al., 2016). *B. cereus* logró inducir la producción de fenilalanina amoniaco liasa, polifenol oxidasa activando ISR en arboles de nísperos contra el patógeno *Colletotrichum acutatum* (Wang et al., 2014). *B. subtilis* promovió ISR en plantas de arroz infectadas con *Rizoctonia solani* actuando casadas de señalización relacionadas con el JA, ET, ácido abscísico (ABA) y señalización mediante la producción de auxinas (Spaepen et al., 2007).

Las especies de *Bacillus* han surgido como una prometedora estrategia para mejorar la resistencia de las plantas frente a una amplia gama de patógenos, siendo la inducción de resistencia sistémica un mecanismo de acción importante. Estos microorganismos tienen la capacidad de colonizar los tejidos vegetales, producir compuestos antimicrobianos y desencadenar respuestas de defensa, lo que los convierte en una valiosa herramienta para la agricultura sostenible y la producción de alimentos.

- **Control Biológico de Plagas**

Durante los últimos años, el control biológico ha estado enfocado en la acción de controlar o manejar una especie de plaga, por lo general un insecto que afecta a un cultivo. Las plagas de insectos son uno de los retos más importantes que enfrentan las plantas y con ellos los agricultores pueden llegar a perder cantidad importante de su producción agrícola (Dame et al., 2021).

En este sentido, ampliamente las cepas de *B. thuringiensis* (Bt) son las más utilizadas para el control de insectos y plagas, debido a la versatilidad de las toxinas que poseen con un amplio espectro insecticida (Alfonzo et al., 2012). A la fecha se tienen reportadas las proteínas Cry, Vip y Sip de Bt. Las proteínas Cry tienen la capacidad de acumularse en la célula de Bt durante la fase de esporulación mientras que otro tipo de proteínas reportadas como Vip y Sip se producen y se secretan durante la fase vegetativa del crecimiento de Bt (Domínguez-Arrizabalaga et al., 2020).

Las proteínas Cry y Cyt tienen la capacidad de cristalizarse y ser tóxicas contra un número cada vez mayor de especies de insectos de los órdenes Lepidoptera, Diptera, Coleoptera, Hymenoptera y Hemiptera, ácaros y nemátodos mientras que las proteínas Vip y Sip también presentan efectos insecticidas contra los órdenes Coleoptera, Hemiptera y Lepidoptera (Domínguez-Arrizabalaga et al., 2020; Sampurna & Mrinal, 2011; Jucovic et al., 2008).

Otro uso importante de estas proteínas es la integración a cultivos de interés mediante recombinación genética, obteniendo cultivo genéticamente modificados que pueden producir las endotoxinas de Bt adquiriendo resistencia a insectos. Varios cultivos, como la papa, el maíz y el algodón, han sido modificados genéticamente para adquirir resistencia contra insectos. Monsanto Co. logró desarrollar una planta de algodón llamado BollGard insertando el Cry2Ab, con esto logró que plagas como el gusano de la cápsula del algodón, el gusano de la cápsula del tabaco y el gusano rosado no afectaran a este cultivo (Roh et al., 2007; Saxena et al., 2020). La ventaja en el uso de esta estrategia comparado con los pesticidas tradicionales, las proteínas de Bt son muy selectivas ya que solo afectan a plagas específicas sin afectar a otros insectos como los polinizadores (Singh et al., 2019).

El uso de Bt en cultivos de interés ha demostrado un éxito destacable en la agricultura sostenible. Los insecticidas basados en Bt son amigables con el medio ambiente y una alternativa viable a los pesticidas químicos sintéticos. Además de la naturaleza selectiva de las proteínas Bt, la capacidad promotora de crecimiento vegetal y la adecuada gestión del manejo integrado de plagas es crucial para el exitoso incremento de la seguridad alimentara mundial.

CONCLUSIONES

Las especies del género *Bacillus* se han mostrado ser importantes aliados en la agricultura, con ejemplos exitosos en todo el mundo y un futuro prometedor por delante. A medida que se sigue investigando y desarrollando nuevas aplicaciones, estos microorganismos tienen el potencial de continuar

transformando la manera en que se cultivan los alimentos, fomentando sistemas agrícolas más productivos, sostenibles y resilientes. Esto se debe en gran medida a su diversidad genética y metabólica, ya que están adaptados a una amplia variedad de condiciones ambientales. Esto los hace candidatos excelentes para un sinnúmero de aplicaciones que se relacionan con el control biológico siendo candidatos para el desarrollo de productos comerciales. Actualmente existen diversos productos basados en los metabolitos producidos por estas especies o conteniendo endosporas de estas. Las especies del género *Bacillus* presentan un potencial para numerosas aplicaciones biotecnológicas en la agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfonzo, A., Lo Piccolo, S., Conigliaro, G., Ventorino, V., Burruano, S., & Moschetti, G. (2012). Antifungal peptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* AG1 active against grapevine fungal pathogens. *Annals of Microbiology*, 62(4), 1593–1599. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0415-2>
- Ambrosini, A., Stefanski, T., Lisboa, B. B., Beneduzi, A., Vargas, L. K., & Passaglia, L. M. P. (2016). *Diazotrophic bacilli* isolated from the sunflower rhizosphere and the potential of *Bacillus mycoides* B38V as biofertiliser. *Annals of Applied Biology*, 168(1), 93–110. <https://doi.org/10.1111/aab.12245>
- Andrić, S., Meyer, T., & Ongena, M. (2020). *Bacillus* Responses to Plant-Associated Fungal and Bacterial Communities. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01350>
- Aslam, S., Hussain, A., & Qazi, J. I. (2016). Dual action of chromium-reducing and nitrogen-fixing *Bacillus megaterium*-ASN3 for improved agro-rehabilitation of chromium-stressed soils. *3 Biotech*, 6(2), 125. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0443-5>
- Bahadir, P., Liaqat, F., & Eltem, R. (2018). Plant growth promoting properties of phosphate solubilizing *Bacillus* species isolated from the Aegean Region of Turkey. *Turkish Journal of Botany*, 42(2), 183–196. <https://doi.org/10.3906/bot-1706-51>
- Berg, G. (2009). Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: Perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84(1), 11–18. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2092-7>
- Berini, F., Katz, C., Gruzdev, N., Casartelli, M., Tettamanti, G., & Marinelli, F. (2018). Microbial and viral chitinases: Attractive biopesticides for integrated pest management. *Prospects in Biotechnology*, 36(3), 818–838. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.002>
- Beris, D., Theologidis, I., Skandalis, N., & Vassilakos, N. (2018). *Bacillus amyloliquefaciens* strain MBI600 induces salicylic acid dependent resistance in tomato plants against *Tomato spotted wilt virus* and *Potato virus Y*. *Scientific Reports*, 8(1), 10320. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28677-3>

- Bhattacharyya, P. N., Goswami, M. P., & Bhattacharyya, L. H. (2016). Perspective of beneficial microbes in agriculture under changing climatic scenario: A review. *Journal of Phytology*, 8(0), 26–41. <https://doi.org/10.19071/jp.2016.v8.3022>
- Chan, Y.-K., Savard, M. E., Reid, L. M., Cyr, T., McCormick, W. A., & Seguin, C. (2009). Identification of lipopeptide antibiotics of a *Bacillus subtilis* isolate and their control of *Fusarium graminearum* diseases in maize and wheat. *BioControl*, 54(4), 567–574. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9201-x>
- Chen, K., Tian, Z., He, H., Long, C., & Jiang, F. (2020). *Bacillus* species as potential biocontrol agents against citrus diseases. *Biological Control*, 151, 104419. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104419>
- Cheng, J., Zhuang, W., Li, N. N., Tang, C. L., & Ying, H. J. (2017). Efficient biosynthesis of d-ribose using a novel co-feeding strategy in *Bacillus subtilis* without acid formation. *Letters in Applied Microbiology*, 64(1), 73–78. <https://doi.org/10.1111/lam.12685>
- Choudhary, D. K., & Johri, B. N. (2009). Interactions of *Bacillus* spp. And plants – With special reference to induced systemic resistance (ISR). *Microbiological Research*, 164(5), 493–513. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>
- Costerousse Benjamin, Schönholzer-Mauclaire Laurie, Frossard Emmanuel, & Thonar Cécile. (2017). Identification of Heterotrophic Zinc Mobilization Processes among Bacterial Strains Isolated from Wheat Rhizosphere (*Triticum aestivum* L.). *Applied and Environmental Microbiology*, 84(1), e01715-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.01715-17>
- Dame, Z. T., Rahman, M., & Islam, T. (2021). Bacilli as sources of agrobiotechnology: Recent advances and future directions. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 14(2), 246–271. <https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1905080>
- Dimkić, I., Stanković, S., Nišavić, M., Petković, M., Ristivojević, P., Fira, D., & Berić, T. (2017). The Profile and Antimicrobial Activity of *Bacillus* Lipopeptide Extracts of Five Potential Biocontrol Strains. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.01500>
- Ding, X., Peng, X.-J., Jin, B.-S., Xiao, M., Chen, J.-K., Li, B., Fang, C.-M., & Nie, M. (2015). Spatial distribution of bacterial communities driven by multiple environmental factors in a beach wetland of the largest freshwater lake in China. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.00129>
- Ding, Y., Wang, J., Liu, Y., & Chen, S. (2005). Isolation and identification of nitrogen-fixing bacilli from plant rhizospheres in Beijing region. *Journal of Applied Microbiology*, 99(5), 1271–1281. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02738.x>

- Domínguez-Arrizabalaga, M., Villanueva, M., Escriche, B., Ancín-Azpilicueta, C., & Caballero, P. (2020). Insecticidal Activity of *Bacillus thuringiensis* Proteins against Coleopteran Pests. *Toxins*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/toxins12070430>
- Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd_Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and Beneficial Microbes: Essential Components for Plants to Balance Stress and Fitness. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>
- Etesami, H. (2020a). Chapter 15—Plant–microbe interactions in plants and stress tolerance. En D. K. Tripathi, V. Pratap Singh, D. K. Chauhan, S. Sharma, S. M. Prasad, N. K. Dubey, & N. Ramawat (Eds.), *Plant Life Under Changing Environment* (pp. 355–396). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818204-8.00018-7>
- Etesami, H. (2020b). Enhanced Phosphorus Fertilizer Use Efficiency with Microorganisms. En R. S. Meena (Ed.), *Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production* (pp. 215–245). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_8
- 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. *Current Research in Biotechnology*, 5, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100128>
- Farhat, A., Chouayekh, H., Ben Farhat, M., Bouchaala, K., & Bejar, S. (2008). Gene Cloning and Characterization of a Thermostable Phytase from *Bacillus subtilis* US417 and Assessment of its Potential as a Feed Additive in Comparison with a Commercial Enzyme. *Molecular Biotechnology*, 40(2), 127–135. <https://doi.org/10.1007/s12033-008-9068-1>
- Fickers, P. (2012). Antibiotic Compounds from Bacillus: Why are they so Amazing? *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 8(1), 38–43. <https://doi.org/10.3844/ajbbsp.2012.38.43>
- Figuroa-López, A. M., Cordero-Ramírez, J. D., Martínez-Álvarez, J. C., López-Meyer, M., Lizárraga-Sánchez, G. J., Félix-Gastélum, R., Castro-Martínez, C., & Maldonado-Mendoza, I. E. (2016). Rhizospheric bacteria of maize with potential for biocontrol of *Fusarium verticillioides*. *SpringerPlus*, 5(1), 330. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1780-x>
- Gao, H., Li, P., Xu, X., Zeng, Q., & Guan, W. (2018). Research on volatile organic compounds from *Bacillus subtilis* cf-3: biocontrol effects on fruit fungal pathogens and dynamic changes during fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00456>
- García-Lopez, A. M., & Delgado, A. (2016). Effect of *Bacillus subtilis* on phosphorus uptake by cucumber as affected by iron oxides and the solubility of the phosphorus source. *Agricultural and Food Science*, 25(3), 216–224. <https://doi.org/10.23986/afsci.56862>
- Goswami, D., Thakker, J. N., & Dhandhukia, P. C. (2016). Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1127500. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1127500>

- Gupta, P. K., Balyan, H. S., Sharma, S., & Kumar, R. (2021). Biofortification and bioavailability of Zn, Fe and Se in wheat: Present status and future prospects. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03709-7>
- Guzman, J. P. M., Alba, J. M., & Torres, M. L. (2020). Isolation, screening, and characterization of biosurfactant-producing bacillus spp. From soil and their potential biofilm inhibitory activities against *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 10(2), 245–248. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2020.10.2.245-248>
- Hong, S., Kim, T. Y., Won, S.-J., Moon, J.-H., Ajuna, H. B., Kim, K. Y., & Ahn, Y. S. (2022). Control of Fungal Diseases and Fruit Yield Improvement of Strawberry Using *Bacillus velezensis* CE 100. *Microorganisms*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020365>
- Huang, L., Li, Q.-C., Hou, Y., Li, G.-Q., Yang, J.-Y., Li, D.-W., & Ye, J.-R. (2017). *Bacillus velezensis* strain HYE5-6 as a potential biocontrol agent against anthracnose on *Euonymus japonicus*. *Biocontrol Science and Technology*, 27(5), 636–653. <https://doi.org/10.1080/09583157.2017.1319910>
- Ibarra-Galeana, J. A., Castro-Martínez, C., Fierro-Coronado, R. A., Armenta-Bojórquez, A. D., & Maldonado-Mendoza, I. E. (2017). Characterization of phosphate-solubilizing bacteria exhibiting the potential for growth promotion and phosphorus nutrition improvement in maize (*Zea mays* L.) in calcareous soils of Sinaloa, Mexico. *Annals of Microbiology*, 67(12), 801–811. <https://doi.org/10.1007/s13213-017-1308-9>
- Ishimaru, Y., Bashir, K., & Nishizawa, N. K. (2011). Zn Uptake and Translocation in Rice Plants. *Rice*, 4(1), 21–27. <https://doi.org/10.1007/s12284-011-9061-3>
- Ji, S. H., Gururani, M. A., & Chun, S.-C. (2014). Isolation and characterization of plant growth promoting endophytic diazotrophic bacteria from Korean rice cultivars. *Special Issue on Plant Growth Promotion.*, 169(1), 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.06.003>
- Jucovic, M., Walters, F. S., Warren, G. W., Palekar, N. V., & Chen, J. S. (2008). From enzyme to zymogen: Engineering Vip2, an ADP-ribosyltransferase from *Bacillus cereus*, for conditional toxicity. *Protein Engineering, Design and Selection*, 21(10), 631–638. <https://doi.org/10.1093/protein/gzn038>
- Khan, A., Doshi, H. V., & Thakur, M. C. (2016). *Bacillus* spp.: A Prolific Siderophore Producer. En M. T. Islam, M. Rahman, P. Pandey, C. K. Jha, & A. Aeron (Eds.), *Bacilli and Agrobiotechnology* (pp. 309–323). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_13
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. *Plants*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. J. (2019). Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases: Relevance beyond efficacy. *Frontiers in Plant Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845>

- Kumawat, N., Kumar, R., Kumar, S., & Meena, V. S. (2017). Nutrient Solubilizing Microbes (NSMs): Its Role in Sustainable Crop Production. En *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture* (pub.1091884157; pp. 25–61). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5343-6_2
- Li, C., Hu, W., Pan, B., Liu, Y., Yuan, S., Ding, Y., Li, R., Zheng, X., Shen, B., & Shen, Q. (2017). Rhizobacterium *Bacillus amyloliquefaciens* Strain SQRT3-Mediated Induced Systemic Resistance Controls Bacterial Wilt of Tomato. *Pedosphere*, 27(6), 1135–1146. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60406-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60406-5)
- Li, X.-Y., Mao, Z.-C., Wu, Y.-X., Ho, H.-H., & He, Y.-Q. (2015). Comprehensive volatile organic compounds profiling of *Bacillus* species with biocontrol properties by head space solid phase microextraction with gas chromatography-mass spectrometry. *Biocontrol Science and Technology*, 25(2), 132–143. <https://doi.org/10.1080/09583157.2014.960809>
- Liu, Y., Yue, Z., Sun, Z., & Li, C. (2023). Harnessing Native *Bacillus* spp. For Sustainable Wheat Production. *Applied and Environmental Microbiology*, 89(2), e0124722. <https://doi.org/10.1128/aem.01247-22>
- Madhaiyan, M., Poonguzhali, S., Lee, J.-S., Lee, K.-C., & Hari, K. (2011). *Bacillus rhizosphaerae* sp. Nov., an novel diazotrophic bacterium isolated from sugarcane rhizosphere soil. *Antonie van Leeuwenhoek*, 100(3), 437–444. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9600-3>
- Massawe, V. C., Hanif, A., Farzand, A., Mburu, D. K., Ochola, S. O., Wu, L., Tahir, H. A. S., Gu, Q., Wu, H., & Gao, X. (2018). Volatile Compounds of Endophytic *Bacillus* spp. Have Biocontrol Activity Against *Sclerotinia sclerotiorum*. *Phytopathology®*, 108(12), 1373–1385. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-18-0118-R>
- Mehta, P., Walia, A., Kulshrestha, S., Chauhan, A., & Shirkot, C. K. (2015). Efficiency of plant growth-promoting P-solubilizing *Bacillus circulans* CB7 for enhancement of tomato growth under net house conditions. *Journal of Basic Microbiology*, 55(1), 33–44. <https://doi.org/10.1002/jobm.201300562>
- Mejri, S., Siah, A., Coutte, F., Magnin-Robert, M., Randoux, B., Tisserant, B., Krier, F., Jacques, P., Reignault, P., & Halama, P. (2018). Biocontrol of the wheat pathogen *Zymoseptoria tritici* using cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis*. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(30), 29822–29833. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9241-9>
- Miao, G., Han, J., Wang, C., Zhang, K., & Wang, S. (2018). Growth inhibition and induction of systemic resistance against *Pythium aphanidermatum* by *Bacillus simplex* strain HS-2. *Biocontrol Science and Technology*, 28(12), 1114–1127. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1514585>
- 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>

- Miller, S. A., Beed, F. D., & Harmon, C. L. (2009). Plant Disease Diagnostic Capabilities and Networks. *Annual Review of Phytopathology*, 47(Volume 47, 2009), 15–38. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080508-081743>
- Morrissey, J., & Guerinot, M. L. (2009). Iron Uptake and Transport in Plants: The Good, the Bad, and the Ionome. *Chemical Reviews*, 109(10), 4553–4567. <https://doi.org/10.1021/cr900112r>
- Nagórska, K., Bikowski, M., & Obuchowski, M. (2007). Multicellular behaviour and production of a wide variety of toxic substances support usage of *Bacillus subtilis* as a powerful biocontrol agent. *Acta Biochimica Polonica*, 54(3), 495–508. PubMed.
- Niu, D., Wang, X., Wang, Y., Song, X., Wang, J., Guo, J., & Zhao, H. (2016). *Bacillus cereus* AR156 activates PAMP-triggered immunity and induces a systemic acquired resistance through a NPR1- and SA-dependent signaling pathway. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 469(1), 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.11.081>
- Nuccio, E. E., Starr, E., Karaoz, U., Brodie, E. L., Zhou, J., Tringe, S. G., Malmstrom, R. R., Woyke, T., Banfield, J. F., Firestone, M. K., & Pett-Ridge, J. (2020). Niche differentiation is spatially and temporally regulated in the rhizosphere. *The ISME Journal*, 14(4), 999–1014. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0582-x>
- Orozco-Mosqueda, Ma. del C., Fadiji, A. E., Babalola, O. O., Glick, B. R., & Santoyo, G. (2022). Rhizobiome engineering: Unveiling complex rhizosphere interactions to enhance plant growth and health. *Microbiological Research*, 263, 127137. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127137>
- Otieno, N., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K. J., & Dowling, D. N. (2015). Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.00745>
- Passari, A. K., Lalsiamthari, P. C., Zothanpuia, Leo, V. V., Mishra, V. K., Yadav, M. K., Gupta, V. K., & Singh, B. P. (2018). Biocontrol of Fusarium wilt of *Capsicum annuum* by rhizospheric bacteria isolated from turmeric endowed with plant growth promotion and disease suppression potential. *European Journal of Plant Pathology*, 150(4), 831–846. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1325-3>
- Penha, R. O., Vandenberghe, L. P. S., Faulds, C., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2020). *Bacillus lipopeptides* as powerful pest control agents for a more sustainable and healthy agriculture: Recent studies and innovations. *Planta*, 251(3), 1–15.
- Pramanik, P., Kalita, C., Kalita, P., & Goswami, A. J. (2020). Evaluating Method of Mica Waste Application in Earthworm Cast-Treated Soil for Enhancing Potassium Availability to the Plants with Reference to Tea. En S. A. Bhat, A. P. Vig, F. Li, & B. Ravindran (Eds.), *Earthworm Assisted Remediation of Effluents and Wastes* (pp. 209–225). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4522-1_13

- Radhakrishnan, R., Hashem, A., & Abd_Allah, E. F. (2017). *Bacillus*: A Biological Tool for Crop Improvement through Bio-Molecular Changes in Adverse Environments. *Frontiers in Physiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00667>
- Ramadoss, D., Lakkineni, V. K., Bose, P., Ali, S., & Annapurna, K. (2013). Mitigation of salt stress in wheat seedlings by halotolerant bacteria isolated from saline habitats. *SpringerPlus*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-6>
- Ramesh, A., Sharma, S. K., Sharma, M. P., Yadav, N., & Joshi, O. P. (2014). Inoculation of zinc solubilizing *Bacillus aryabhatai* strains for improved growth, mobilization and biofortification of zinc in soybean and wheat cultivated in Vertisols of central India. *Applied Soil Ecology*, 73, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.08.009>
- Riley, E. P., Schwarz, C., Derman, A. I., & Lopez-Garrido, J. (2020). Milestones in *Bacillus subtilis* sporulation research. *Microbial Cell*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.15698/mic2021.01.739>
- Roh, J. Y., Choi, J. Y., Li, M. S., Jin, B. R., & Je, Y. H. (2007). *Bacillus thuringiensis* as a specific, safe, and effective tool for insect pest control. *Journal of microbiology and biotechnology*, 17(4), 547.
- Roy, D. (2020). Magnitude and Mechanism of Siderophore as a Potential Tool in Eco Friendly Agriculture. *International Journal of Bioresource Science*, 7(1). <https://doi.org/10.30954/2347-9655.01.2020.7>
- Saeid, A., Prochownik, E., & Dobrowolska-Iwanek, J. (2018). Phosphorus Solubilization by *Bacillus* Species. *Molecules*, 23(11). <https://doi.org/10.3390/molecules23112897>
- Sah, S., & Singh, R. (2015). Siderophore: Structural And Functional Characterisation – A Comprehensive Review. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 61(3), 97–114. <https://doi.org/10.1515/agri-2015-0015>
- Saha, M., Maurya, B. R., Meena, V. S., Bahadur, I., & Kumar, A. (2016). Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 7, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.06.007>
- Sampurna S. & Mrinal K. M. (2011). Molecular Characterization of a Novel Vegetative Insecticidal Protein from *Bacillus thuringiensis* Effective Against Sap-Sucking Insect Pest. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(9), 937–946. <https://doi.org/10.4014/jmb.1105.05030>
- Saxena, A. K., Kumar, M., Chakdar, H., Anuroopa, N., & Bagyaraj, D. J. (2020). *Bacillus* species in soil as a natural resource for plant health and nutrition. *Journal of Applied Microbiology*, 128(6), 1583–1594. <https://doi.org/10.1111/jam.14506>
- Shakeel, M., Rais, A., Hassan, M. N., & Hafeez, F. Y. (2015). Root Associated *Bacillus* sp. Improves Growth, Yield and Zinc Translocation for Basmati Rice (*Oryza sativa*) Varieties. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2015.01286>

- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Shrestha, A., Sultana, R., Chae, J.-C., Kim, K., & Lee, K.-J. (2015). *Bacillus thuringiensis* C25 which is rich in cell wall degrading enzymes efficiently controls lettuce drop caused by *Sclerotinia minor*. *European Journal of Plant Pathology*, 142(3), 577–589. <https://doi.org/10.1007/s10658-015-0636-5>
- Sindhu, S. S., Sharma, R., Sindhu, S., & Phour, M. (2019). Plant Nutrient Management Through Inoculation of Zinc-Solubilizing Bacteria for Sustainable Agriculture. En B. Giri, R. Prasad, Q.-S. Wu, & A. Varma (Eds.), *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment* (pp. 173–201). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_8
- Singh, A., Bhardwaj, R., & Singh, I. K. (2019). Biocontrol Agents: Potential of Biopesticides for Integrated Pest Management. En B. Giri, R. Prasad, Q.-S. Wu, & A. Varma (Eds.), *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment* (pp. 413–433). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18933-4_19
- Singh, D., Rajawat, M. V. S., Kaushik, R., Prasanna, R., & Saxena, A. K. (2017). Beneficial role of endophytes in biofortification of Zn in wheat genotypes varying in nutrient use efficiency grown in soils sufficient and deficient in Zn. *Plant and Soil*, 416(1), 107–116. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3189-x>
- Singh, M., Srivastava, M., Kumar, A., Singh, A. K., & Pandey, K. D. (2020). 4—Endophytic bacteria in plant disease management. In Kumar, A. & Singh, V. K. (Eds.), *Microbial Endophytes*, 61–89. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818734-0.00004-8>
- Skerman, V. B. D., McGowan, Vicki., & Sneath, P. H. A. (1980). Approved Lists of Bacterial Names. En *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 30(1), 225–420. Microbiology Society. <https://doi.org/10.1099/00207713-30-1-225>
- Spaepen, S., Vanderleyden, J., & Remans, R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31(4), 425–448. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x>
- Tahir, H. A. S., Gu, Q., Wu, H., Niu, Y., Huo, R., & Gao, X. (2017). *Bacillus* volatiles adversely affect the physiology and ultra-structure of *Ralstonia solanacearum* and induce systemic resistance in tobacco against bacterial wilt. *Scientific Reports*, 7(1), 40481. <https://doi.org/10.1038/srep40481>
- Tao, G.-C., Tian, S.-J., Cai, M.-Y., & XIE, G.-H. (2008). Phosphate-Solubilizing and -Mineralizing Abilities of Bacteria Isolated from Soils1 1Project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, the Ministry of Education of the P.R. China. *Pedosphere*, 18(4), 515–523. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60042-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60042-9)

- Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture. *Plants*, 11(22). <https://doi.org/10.3390/plants11223065>
- Tonelli, M. L., Taurian, T., Ibáñez, F., Angelini, J., & Fabra, A. (2010). Selection and in vitro characterization of biocontrol agents with potential to protect peanut plants against fungal pathogens. *Journal of Plant Pathology*, 92(1), 73–82.
- Torres, M. J., Pérez Brandan, C., Sabaté, D. C., Petroselli, G., Erra-Balsells, R., & Audisio, M. C. (2017). Biological activity of the lipopeptide-producing *Bacillus amyloliquefaciens* PGPBacCA1 on common bean *Phaseolus vulgaris* L. pathogens. *Biological Control*, 105, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.12.001>
- United Nations (2024). Población. United Nations. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Verma, P., Yadav, A. N., Khannam, K. S., Panjiar, N., Kumar, S., Saxena, A. K., & Suman, A. (2015). Assessment of genetic diversity and plant growth promoting attributes of psychrotolerant bacteria allied with wheat (*Triticum aestivum*) from the northern hills zone of India. *Annals of Microbiology*, 65(4), 1885–1899. <https://doi.org/10.1007/s13213-014-1027-4>
- Vetterlein, D., Carminati, A., Kögel-Knabner, I., Bienert, G. P., Smalla, K., Oburger, E., Schnepf, A., Banitz, T., Tarkka, M. T., & Schlüter, S. (2020). Rhizosphere Spatiotemporal Organization—A Key to Rhizosphere Functions. *Frontiers in Agronomy*, 2. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fagro.2020.00008>
- Wagner, S. (2011). Biological Nitrogen Fixation | Learn Science at Scitable. <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/biological-nitrogen-fixation-23570419/>
- Wang, X., Wang, L., Wang, J., Jin, P., Liu, H., & Zheng, Y. (2014). *Bacillus cereus* AR156-Induced Resistance to *Colletotrichum acutatum* Is Associated with Priming of Defense Responses in Loquat Fruit. *PLOS ONE*, 9(11), e112494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112494>
- Wang, Y., Zhang, C., Liang, J., Wang, L., Gao, W., Jiang, J., & Chang, R. (2020). Surfactin and fengycin B extracted from *Bacillus pumilus* W-7 provide protection against potato late blight via distinct and synergistic mechanisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(17), 7467–7481. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10773-y>
- Whitman, W. (2010). Berge's Manual of Determinative Bacteriology: The Firmicutes. *Systematic Bacteriology*, 19–722.
- Wu, Y., Zhou, J., Li, C., & Ma, Y. (2019). Antifungal and plant growth promotion activity of volatile organic compounds produced by *Bacillus amyloliquefaciens*. *MicrobiologyOpen*, 8(8), e00813. <https://doi.org/10.1002/mbo3.813>
- Yang, L., Han, X., Zhang, F., Goodwin, P. H., Yang, Y., Li, J., Xia, M., Sun, R., Jia, B., Zhang, J., Quan, X., Wu, C., Xue, B., & Lu, C. (2018). Screening *Bacillus* species as biological control agents of

Gaeumannomyces graminis var. *Tritici* on wheat. *Biological Control*, 118, 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2017.11.004>

- Yousuf, J., Thajudeen, J., Rahiman, M., Krishnankutty, S., P. Alikunj, A., & A. Abdulla, M. H. (2017). Nitrogen fixing potential of various heterotrophic *Bacillus* strains from a tropical estuary and adjacent coastal regions. *Journal of Basic Microbiology*, 57(11), 922–932.
<https://doi.org/10.1002/jobm.201700072>
- Zaheer, A., Malik, A., Sher, A., Mansoor Qaisrani, M., Mehmood, A., Ullah Khan, S., Ashraf, M., Mirza, Z., Karim, S., & Rasool, M. (2019). Isolation, characterization, and effect of phosphate-zinc-solubilizing bacterial strains on chickpea (*Cicer arietinum* L.) growth. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(5), 1061–1067. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.04.004>
- Zawadzka, A. M., Abergel, R. J., Nichiporuk, R., Andersen, U. N., & Raymond, K. N. (2009). Siderophore-Mediated Iron Acquisition Systems in *Bacillus cereus*: Identification of Receptors for Anthrax Virulence-Associated Petrobactin. *Biochemistry*, 48(16), 3645–3657.
<https://doi.org/10.1021/bi8018674>
- Zayed, O., Hewedy, O. A., Abdelmoteleb, A., Ali, M., Youssef, M. S., Roumia, A. F., Seymour, D., & Yuan, Z.-C. (2023). Nitrogen Journey in Plants: From Uptake to Metabolism, Stress Response, and Microbe Interaction. *Biomolecules*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/biom13101443>
- Zheng, Y., Chen, F., & Wang, M. (2013). Use of *Bacillus*-Based Biocontrol Agents for Promoting Plant Growth and Health. In Maheshwari, D. K. (Ed.), *Bacteria in Agrobiolgy: Disease Management* (pp. 243–258). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33639-3_9

Índice Remissivo

A

agar, 194, 203
agaváceas, 191, 192, 203
Análisis proximal, 91

B

Bahía de Lobos, 8, 9, 10, 13
biofertilización, 6, 14

C

cactáceas, 191, 192, 193, 194, 201, 203
Convolvulus arvensis, 73, 74
Cromatografía de gases, 168

E

Extracción por arrastre de vapor, 28, 29
Extracción por maceración, 29, 30
extractos de plantas, 139, 146, 148

F

feromonas, 139, 142
fitoestabilización, 197, 203
Formulación, 206

I

in vitro, 139, 140, 141

M

metales pesados, 191, 192, 193, 194, 195, 196,
197, 198, 199, 200, 201, 202, 203
México, 208

P

Parkinsonia aculeata, 6, 8
Pleurotus, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56
Proteína cruda, 92
Pulsos ultrasónicos, 32

Q

Quitinasas, 63

S

semi-desierto, 9
semioquímicos, 139, 149

T

transgénicos, 139



Dr. Leandris Argente-Martínez. Profesor Investigador Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesor Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Líder del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular del estrés.



Dra. Ofelda Peñuelas-Rubio. Profesora Investigadora Titular C, del Tecnológico Nacional de México, Campus valle del Yaqui. Doctorado en Ciencias Biotecnológicas por el Instituto Tecnológico de Sonora. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel 1. Profesora Perfil Deseable (PRODEP) de la Secretaría de Educación Pública de México, Miembro del Cuerpo Académico ITVAYA-CA-3. Línea de investigación: Agricultura sustentable, Fisiología, Bioquímica, Biología Celular y Molecular de sistemas terrestres y costeros.



Dra. Lucila Perales-Aguilar. Profesora Investigadora del Tecnológico Nacional de México, miembro del S.N.I. candidata, con experiencia en biotecnología de plantas del semidesierto y remediación de suelos contaminados con metales pesados. Profesor con perfil deseable de la Secretaría de Educación Pública. Línea de investigación sobre Producción de Cactáceas y Agavaceas *in vitro* y remediación de suelos del semidesierto



Dr. Ugur Azizoglu es profesor asociado en el Departamento de Producción Agrícola y Animal de la Universidad de Kayseri y actualmente continúa su investigación en el Centro de Células Madre y Genoma de la Universidad Erciyes (GENKÖK), Türkiye. Se graduó de la Facultad de Ciencias y del Departamento de Biología de la Universidad Erciyes en julio de 2007 y obtuvo una Maestría en Ciencias en Biología en junio de 2009. Completó su doctorado en el Departamento de Biología de la Universidad Erciyes en 2014. El enfoque de sus estudios es la biotecnología microbiana, el control biológico, las bacterias genéticamente modificadas y las

bacterias promotoras del crecimiento de las plantas. El Dr. Azizoglu ha participado en numerosas conferencias y talleres y se ha desempeñado como revisor de revistas internacionales.



El presente compendio científico “Biotecnología agropecuaria aplicada” aborda temas relevantes del área agropecuaria. Se hace énfasis en el aprovechamiento de microorganismos bacterianos y fúngicos y su potencial uso en los agroecosistemas. Estas aplicaciones con la finalidad de promover prácticas sustentables de producción, desde la promoción del crecimiento vegetal en condiciones ambientales adversas, el biocontrol de fitopatógenos y malezas, así como la biorremediación. También se exploran metodologías novedosas para la obtención de compuestos antioxidantes y antifúngicos. Además, se presentan avances en la elaboración de nuevos alimentos para la producción acuícola, como alternativas para la nutrición efectiva.

Los trabajos aquí presentados constituyen evidencias de los pasos sólidos que dan los diferentes grupos de investigación nacionales e internacionales del área de la biotecnología agropecuaria. Se agradece la participación de los autores que pertenecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII-CONAHCYT) de los Estados Unidos Mexicanos.



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil
Telefone (66) 9608-6133 (Whatsapp)
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br