

Tendencias Globales de Investigación sobre Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal en Maíz (*Zea mays* L.): Un Análisis Bibliométrico Global Research Trends on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Maize (*Zea mays* L.): A Bibliometric Analysis

Jesús Juárez-San Juan¹, Francisco Hernández-Rosas^{1†}, María Esther Méndez-Cadena²,
José Andrés Herrera-Corredor¹ y Mauro Sierra-Macías³

¹ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, Col. Congregación Manuel León. 94953 Amatlán de los Reyes, Veracruz, México; (J.J.S.J.), (F.H.R.), (J.A.H.C.).

[†] Autor para correspondencia: fhrosas@colpos.mx

² Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Boulevard Forjadores No. 205, Santiago Momoxpan. 72760 San Pedro Cholula, Puebla, México; (M.E.M.C.).

³ INIFAP-Campo Experimental Cotaxtla carretera Veracruz-Córdoba km 34. 91700 Medellín de Bravo, Veracruz, México; (M.S.M.).

RESUMEN

El cultivo del maíz enfrenta retos crecientes debido a las condiciones ambientales adversas y la dependencia de fertilizantes químicos, lo que compromete su sostenibilidad. Ante ello, las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, por sus siglas en inglés) constituyen una alternativa biotecnológica viable para mejorar el rendimiento del cultivo, reducir el uso de fertilizantes y mitigar el impacto ambiental. El análisis bibliométrico realizado en 2024 tuvo como objetivo analizar las tendencias en la investigación, destacando el papel de las PGPR en maíz, destacando la eficiencia de la fertilización nitrogenada y fosforada, la reducción de costos de producción y el impulso de prácticas agrícolas sustentables. Se recopilaron 882 publicaciones (1986-2024) y se analizaron con el software VOSviewer, considerando patrones de coautoría, cocitación y coocurrencia de palabras clave. Se destacaron los aportes de países como Brasil, China y Pakistán, así como la relevancia de los géneros bacterianos *Azospirillum*, *Pseudomonas* y *Bacillus*, por sus efectos positivos en el rendimiento del maíz, la tolerancia al estrés abiótico y la eficiencia en el uso de fertilizantes. Los resultados muestran una evolución temática desde la caracterización de rizobacterias hacia aplicaciones centradas en la resiliencia agrícola. Se concluye que las PGPR tienen un alto potencial para fortalecer la sostenibilidad agrícola, especialmente si se integran con el germoplasma local y prácticas tradicionales de comunidades indígenas como los pueblos mixe, náhuatl y totonaco. El hallazgo de bacterias fijadoras de nitrógeno en el mucílago de variedades nativas de maíz representa una oportunidad clave. No obstante, su implementación efectiva requiere superar barreras técnicas, normativas y socioculturales, mediante investigación multidisciplinaria y transferencia tecnológica al campo.

Palabras clave: *germoplasma local, inoculantes microbianos, sostenibilidad agrícola.*

SUMMARY

Maize cultivation faces growing challenges due to adverse environmental conditions and reliance on chemical fertilizers, which compromise its sustainability. In response, plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have emerged as a viable biotechnological alternative for enhancing crop yields, reducing fertilizer use, and mitigating environmental impact. This study, conducted in 2024, aimed to analyze scientific trends, emerging topics, and significant contributions regarding the use of PGPR in maize through a bibliometric analysis. A total of 882 publications (1986-2024) were collected and analyzed using VOSviewer software, examining patterns



Cita recomendada:

Juárez-San Juan, J., Hernández-Rosas, F. Méndez-Cadena, M. E., Herrera-Corredor, J. E., & Sierra-Macías, M. (2026). Tendencias Globales de Investigación sobre Rizobacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal en Maíz (*Zea mays* L.): Un Análisis Bibliométrico. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-17. e2341. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2341>

Recibido: 25 de junio de 2025.

Aceptado: 10 de noviembre de 2025.

Revisión: Volumen 44.

Marzo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Luis G. Hernandez Montiel

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

of co-authorship, co-citation, and keyword co-occurrence. The contributions of countries such as Brazil, China, and Pakistan were highlighted, as well as the relevance of bacterial genera such as *Azospirillum*, *Pseudomonas*, and *Bacillus* for their positive effects on maize yield, abiotic stress tolerance, and fertilizer use efficiency. The results reveal a thematic evolution from rhizobacteria characterization toward applications focused on agricultural resilience. It is concluded that PGPR have strong potential to enhance agricultural sustainability, especially when integrated with local germplasm and traditional practices of Indigenous communities such as the Mixe, Nahuatl, and Totonac peoples. The discovery of nitrogen-fixing bacteria in the mucilage of native maize varieties represents a key opportunity; however, effective implementation requires overcoming technical, regulatory, and sociocultural barriers through multidisciplinary research and technological transfer to the field.

Index words: local germplasm, microbial inoculants, agricultural sustainability.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los tres cultivos de importancia a nivel mundial junto con el trigo (*Triticum* spp.) y el arroz (*Oriza sativa* L.), valorados por su aporte nutrimental y de carbohidratos. Su principal destino es la alimentación humana, aunque una gran cantidad de derivados se utiliza en la fabricación de productos industriales (Adebisi *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2023). El volumen de producción anual se estima en 1241 millones de toneladas de maíz en una superficie aproximada de 208 millones de hectáreas, el rendimiento mundial promedio es de 5 962.3 kg ha⁻¹, en condiciones de riego y temporal (FAOSTAT, 2025a).

Para atender la demanda alimentaria de maíz, durante el ciclo agrícola 2023-2024 se produjeron aproximadamente 1210 millones de toneladas (USDA, 2025), y se requirieron insumos como fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos (Valencia, Vásquez, Mieles, Morante y Velásquez, 2024), cuyo elevado costo impacta directamente en la rentabilidad del cultivo en varios países (Sangoquiza-Caiza, Zambrano-Mendoza, Borgues-García y Cho, 2024). La creciente demanda del sector pecuario y de la industria de biocombustibles ha impulsado la producción mundial de maíz, destacándose regiones altamente tecnificadas como Estados Unidos y Brasil, donde los rendimientos superan las 10 Mg ha⁻¹ (USDA, 2025).

Aunque la demanda mundial de maíz fue cubierta en 2023-2024, en México la demanda fue de 44.8 millones de toneladas (Medina-Hernandez, Caamal, Pat y Ávila, 2024), y que para cubrir dicha demanda se importaron 18.5 millones de toneladas principalmente de maíz amarillo (FAOSTAT, 2023), lo que representó el 41% de la demanda nacional; Aunque el maíz lidera la agricultura nacional en superficie cultivada y valor de producción, su productividad por unidad de superficie es inferior a la de otros cultivos (FAOSTAT, 2025a; SIAP, 2024).

Esta dependencia de las importaciones refleja la falta de soberanía alimentaria en torno a este cereal estratégico. De las 32 entidades federativas que conforman el país, solo 10 contribuyen de manera significativa a su producción y a partir de la comparación entre producción total y rendimiento, se observa una marcada heterogeneidad regional. Sinaloa lidera de forma consistente con 6.6 millones de toneladas y el mayor rendimiento (12.3 Mg ha⁻¹) (SIAP, 2024), evidenciando alta eficiencia productiva. Jalisco ocupa el segundo lugar en producción con 3.5 millones de toneladas, aunque con un rendimiento intermedio (6.6 Mg ha⁻¹) (SIAP, 2025), lo que sugiere una amplia superficie cultivada más que una eficiencia elevada. En contraste, Veracruz, Chiapas y Puebla presentan producciones moderadas a bajas de 1.34, 1.33 y 1.14 millones de toneladas, respectivamente, acompañadas de rendimientos inferiores a 2.3, 1.9 y 2.2 Mg ha⁻¹, respectivamente (SIAP, 2025).

En 2024, la producción de maíz en México se vio gravemente afectada por la sequía, especialmente en Sinaloa, donde cayó más del 50%, alcanzando solo 3.4 millones de toneladas (FAO, 2025). Esto redujo la producción nacional de 27.5 a 23.7 millones de toneladas por tercer año consecutivo, y se estima que las importaciones aumenten un 27% respecto a 2023, llegando a 23.5 millones de toneladas (FAO, 2025).

A esto se suma la dependencia a insumos agrícolas, puesto que, en 2023 México importó aproximadamente 1.2 millones toneladas de fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos, lo que representa alrededor del 73% de la demanda nacional total de 1.65 millones de toneladas (FAOSTAT, 2025b). Esta situación revela un panorama particularmente complejo, dado que, a pesar del volumen considerable de fertilizantes químicos importados, no se ha logrado satisfacer de manera eficiente la demanda interna de nutrientes esenciales para los cultivos (FAO, 2025).

En este contexto, el uso de microorganismos benéficos surge como una alternativa prometedora frente a los efectos combinados de la sequía y la alta dependencia de fertilizantes químicos. Diversos microorganismos, como las bacterias y los hongos, son capaces de establecer relaciones mutualistas, a nivel radicular, con las

plantas (Compant, Samad, Faist y Sessitsch, 2019). Estas relaciones promueven el desarrollo vegetal mediante mecanismos biológicos que mejoran la disponibilidad de nutrientes, estimulan el crecimiento radicular y aumentan la tolerancia al estrés hídrico, lo que representa una opción sustentable, económica y ecológica que minimiza la contaminación, así como los riesgos para la salud humana (Faith-Vargas y Rivas-Solano, 2012; Hernández-Aguilar, Bautista-García, Merecias-Aparicio, Vázquez-Ortiz y Gómez-Arango, 2022).

Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), intervienen en los ciclos del carbono, nitrógeno y azufre, además de contribuir a la descomposición de residuos orgánicos y a la degradación de compuestos contaminantes (Guzmán-Trampe, 2017). En los últimos años, ha incrementado el interés por su aplicación, en especial los géneros *Rhizobium* y *Azospirillum* (García-Olivares, Mendoza-Herrera y Mayek-Pérez, 2012; Sangoquiza-Caiza et al., 2024). La inoculación de semillas constituye una estrategia complementaria de nutrición y desarrollo para las plantas (Moreno-Reséndez, García-Mendoza, Reyes-Carrillo, Vázquez-Arroyo, y Cano-Ríos, 2018). Así, las PGPRs que favorecen la absorción y asimilación de nutrientes representan una opción tecnológica relevante para avanzar hacia una agricultura más sostenible (Zankar, Abarza, Boccardo, y Altamirano, 2017; Rodríguez, Martínez y Cruz, 2021).

El uso de bacterias promotoras de crecimiento vegetal es una alternativa ecológica para disminuir el uso de fertilizantes de síntesis química a base de nitrógeno, fósforo y potasio en el maíz, esto permite manejos alternativos que optimizan la producción sustentable. El objetivo de este estudio fue realizar una revisión bibliométrica, en la base de datos de Scopus, sobre el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en la producción sostenible de maíz, analizando las tendencias de investigación y su contribución a la eficiencia en la fertilización, a la reducción de costos y a la promoción de prácticas agrícolas sustentables. Para ello, se identificaron las principales contribuciones científicas, autores, países y temas relacionados con el propósito de proponer estrategias que optimicen la producción agrícola respetando los agroecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis bibliométrico realizado se basa en un enfoque cuantitativo apoyado en algoritmos informáticos y técnicas de visualización. Para esta revisión se utilizó la herramienta VOSviewer (van Eck y Waltman, 2023), que genera mapas de coocurrencia a partir de palabras clave, especializada en bibliometría.

La literatura se analizó siguiendo dos métodos: el análisis de desempeño (en función de autores, países e instituciones) y el mapeo científico (Tang, Liao, Wan, Herrera-Viedma, & Rosen, 2018). Se utilizó la base de datos Scopus (Elsevier), elegida por su amplia cobertura en comparación con bases gratuitas como Google Scholar (Sweileh, 2017). La consulta se realizó con base en las siguientes palabras clave: "promoting bacteria" OR "growth promoting" OR "PGPR" AND "bacteria" OR "rhizobacteria" AND "maize" OR "corn" en los campos de título, resumen y palabras clave, sin restricciones de fecha. Esto generó 882 documentos.

Se aplicaron filtros para inclusión de documentos relevantes, se realizó una depuración manual de los datos (unificación de nombres y revistas) para garantizar la precisión del análisis. Se consideraron únicamente artículos de revistas, artículos de conferencias, capítulos de libros y revisión de conferencias, sin limitar por año de publicación.

El análisis del rendimiento de los datos se realizó utilizando la función de Scopus, que reduce los descuidos de análisis debido al reprocesamiento de los datos originales, para los artículos más citados, el punto de corte fue 10, y se empleó Microsoft Office LTSC Profesional Plus 2021 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA). para crear el gráfico sobre el crecimiento de las publicaciones a lo largo del tiempo.

Análisis de Contenido

Con la información recolectada, se realizó un análisis descriptivo de la actividad científica, las revistas, documentos y países más citados. Para el análisis bibliométrico se utilizó el software VOSviewer (Van-Eck y Waltman, 2023). Se aplicaron cinco tipos de análisis: coocurrencia de palabras, cocitaciones, de coautores y de acoplamiento bibliográfico (Zupic y Čater, 2015).

Se recuperaron 1939 palabras clave, de las cuales se seleccionaron 462 para lograr una visualización clara. El análisis de coocurrencia de palabras clave y términos académicos se basó en la fuerza de asociación (AS), con una resolución de 1.00, una escala de visualización del 100%, y aplicando parámetros de filtrado como un número de registros ≥ 10 y un tamaño mínimo de clúster de 10 (Van-Eck y Waltman, 2010). El mapa de red generado posiciona términos más frecuentes y asociados más próximos y con círculos de mayor tamaño, eliminando términos irrelevantes (Yeung, Goto, y Leung, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del Rendimiento Científico

El análisis abarcó el periodo de 1986 a 2024, durante el cual se identificaron 882 documentos, de los cuales el 94% correspondió a artículos científicos. La producción sobre bacterias promotoras del crecimiento en maíz inició en 1986 y mantuvo un crecimiento gradual hasta 2014. A partir de 2015 se registró un incremento notable en el número de publicaciones, alcanzando un primer pico en 2016 y otro en 2020, con una tendencia sostenida al alza hasta 2024 (Figura 1). El promedio anual de publicaciones fue de 4.5 artículos entre 1986 y 2014, mientras que en el periodo de 2015 a 2024 se elevó a 68.5, marcando un cambio significativo en el interés académico sobre el tema.

De los documentos analizados, 686 fueron citados, sumando 23 087 citas, con un promedio de 29 por documento. Tres artículos superaron las 400 citas, 18 se ubicaron entre 200 y 399, 35 entre 100 y 199, y 345 entre 11 y 99 citas. En cuanto a las fuentes, cinco revistas concentraron el 16% de los artículos: *Plant and Soil*, *Microbiological Research*, *Applied Soil Ecology*, *Frontiers in Plant Science* y *Plants*, destacadas por su enfoque en microbiología, interacción planta-suelo, fisiología vegetal y biotecnología agrícola. Geográficamente, Brasil lideró en publicaciones, seguido de China, India, Pakistán y EE. UU., con destacada participación de instituciones como la Universidade de São Paulo, la University of Agriculture, Faisalabad y la Quaid-i-Azam University (Cuadro 1).

Finalmente, los artículos más citados abordaron temas como la promoción del crecimiento, absorción de nutrientes como nitrógeno y fósforo principalmente, estrés por sequía, estrés salino y aumento en el rendimiento en maíz (Cuadro 2). Se identificaron como términos clave: *Pseudomonas* spp., rizobacterias, *Azospirillum brasilense*, *Azospirillum lipoferum*, diazótrofos bacterianos no simbióticos y *Rhizobium leguminosarum* biovar *phaseoli*.

Cartografía Científica

El análisis de coocurrencia de términos reveló cinco principales líneas de investigación en rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPRs) en maíz, a partir de 216 palabras clave con más de cinco coocurrencias. Los clústeres identificados fueron: (1) bacterias y hongos (verde), (2) bacterias promotoras como *Azospirillum* y su papel en la fijación de nitrógeno (verde turquesa), (3) fitohormonas y tolerancia al estrés (naranja), (4) suelo y procesos de biorremediación (amarillo), y (5) rizobacterias y su función en la solubilización de nutrientes (violeta) (Figura 2). La evolución temática muestra un cambio desde estudios centrados en *Pseudomonas*, *Azospirillum* y *Rhizobium* (hasta 2014), hacia enfoques más recientes en genómica y el uso de *Bacillus* como rizobacteria (desde 2020).

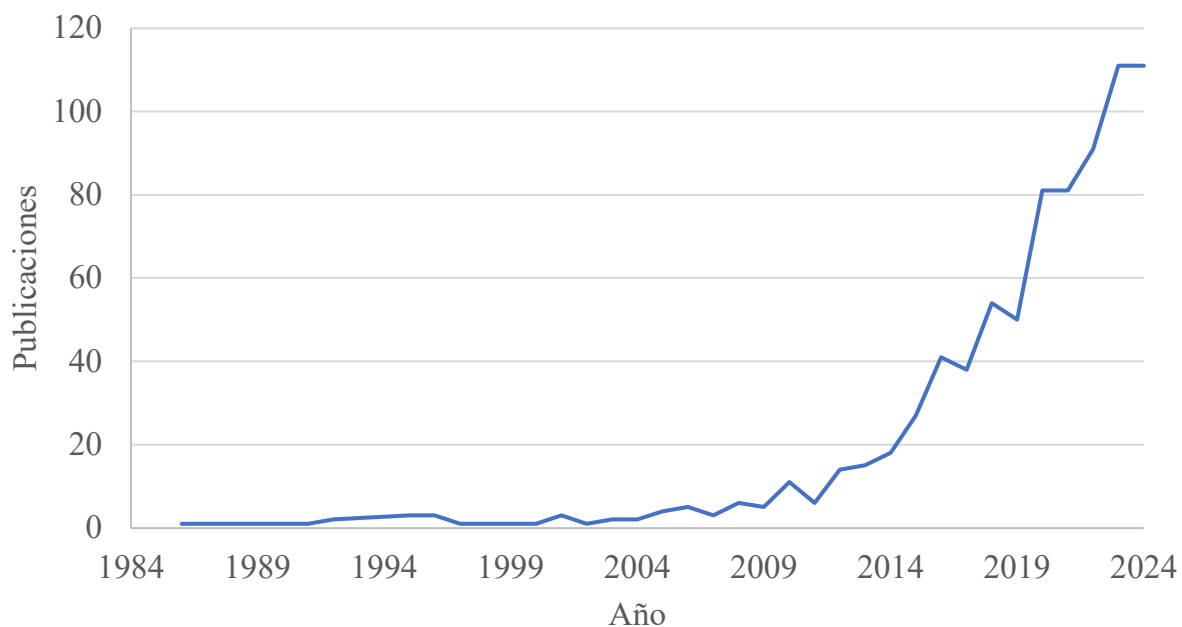


Figura 1. Comportamiento de las publicaciones sobre "promoting bacteria" y "maize" (1986-2024): total 882 documentos.
Figure 1. Publication Behavior on "Promoting Bacteria" and "Maize" (1986-2024): Total 882 Documents.

Cuadro 1. Análisis de desempeño: Revistas, países e instituciones con mayor número de publicaciones sobre bacterias promotoras del crecimiento vegetal en maíz (los rankings son independientes) para "promoting bacteria" "rhizobacteria" and "maize" de 1986 a 2024 (15 de octubre).

Table 1. Performance analysis: Journals, countries, and institutions with the highest number of publications on plant growth-promoting bacteria in maize (rankings are independent) for the terms "promoting bacteria," "rhizobacteria," and "maize" from 1986 to 2024 (October 15).

Ranking de Revistas	Pub	Ranking de Países	Pub	Ranking de instituciones	Pub
Plant and Soil	30	Brasil	160	Universidade de São Paulo	33
Microbiological Research	28	China	125	University of Agriculture, Faisalabad	32
Applied Soil Ecology	24	India	110	Quaid-i-Azam University	30
Frontiers in Plant Science	23	Pakistán	105	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa	29
Plants	22	Estados Unidos	53	Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho	20
Agronomy	19	Arabia Saudita	40	King Saud University	20
Rhizosphere	19	Alemania	33	Universidade Estadual de Londrina	18
Microorganisms	18	Irán	30	Universidade Federal de Santa Catarina	17
Soil Biology and Biochemistry	14	México	30	Universidad Nacional de Rio Cuarto	16
Environmental Science and Pollution Research	15	Egipto	29	The Islamia University of Bahawalpur 271	16

Pub = publicaciones.

Pub = publications.

En conjunto, los cinco clústeres revelan una transición conceptual de estudios centrados en la taxonomía y fisiología de géneros clásicos como *Pseudomonas*, *Rhizobium* y *Azospirillum* hacia investigaciones integrativas que incorporan genómica, resiliencia al estrés y sostenibilidad agroambiental. Esta evolución coincide con la tendencia global de sustituir fertilizantes sintéticos por estrategias microbianas multifuncionales, evidenciando el potencial de las PGPRs para fortalecer la sostenibilidad del cultivo de maíz en contextos de vulnerabilidad ambiental y socioterritorial.

Los resultados del análisis bibliométrico evidencian que, entre 1986 y 2014, las investigaciones sobre rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en maíz se concentraron en cinco núcleos temáticos interrelacionados: rizobacterias (rojo), bacterias aplicadas en maíz (verde), microorganismos del suelo (azul), fijación de nitrógeno en plantas (amarillo) y solubilización de fosfatos con *Pseudomonas* (violeta) (Figura 3). Durante este periodo, las investigaciones se centraron principalmente en la caracterización de los microorganismos, su viabilidad y su potencial fungicida para el control biológico de plagas.

El primer clúster, rizobacterias, concentró esfuerzos en la descripción taxonómica y fisiológica de especies con capacidad para asociarse a las raíces del maíz y mejorar su desarrollo; en este contexto, el trabajo de Van Berkum y Bohlool (1980) sobre el aislamiento de *Azospirillum brasilense* y *A. lipoferum* fue decisivo para demostrar la existencia de bacterias diazotróficas de vida libre con efectos positivos en gramíneas. Estos hallazgos sentaron las bases para la comprensión de la simbiosis planta-microorganismo, su relevancia en la nutrición vegetal y los mecanismos de fijación biológica de nitrógeno en cultivos no leguminosos.

El segundo clúster, bacterias aplicadas en maíz, reflejó una transición de la caracterización a la aplicación agronómica. Investigaciones como las de Okon y Labandera-González (1994) demostraron incrementos significativos en el rendimiento del maíz mediante la inoculación con *Azospirillum*, atribuidos a la producción de fitohormonas como auxinas y citoquininas. De manera similar, Bashan, Holguin y de Bashan (2004) confirmaron que las rizobacterias mejoran la arquitectura radicular, la absorción de nutrientes y la tolerancia a condiciones ambientales adversas. Estas evidencias consolidaron el uso de inoculantes bacterianos como una alternativa biotecnológica viable para optimizar el crecimiento del maíz.

El tercer clúster, microorganismos del suelo, estuvo dominado por estudios que exploraron la diversidad microbiana asociada al maíz y el papel de esta en el control biológico. Kloepper, Leong, Teintze y Schroth (1980) identificaron cepas de *Pseudomonas fluorescens* con actividad antifúngica, capaces de suprimir enfermedades causadas por *Fusarium* y *Rhizoctonia*. De igual modo, Glick (1995) destacó la importancia de las bacterias productoras de ACC desaminasa en la reducción del estrés etilénico, lo que permite una mejor adaptación de las plantas a condiciones de estrés. Estos hallazgos expandieron la comprensión de la rizósfera como un entorno dinámico donde la competencia microbiana beneficia el crecimiento vegetal.

Cuadro 2. Los 10 artículos más citados sobre “promoting bacteria” “rhizobacteria” y “maize” de 1986 a 2024 (15 de octubre).
Table 2. The 10 most cited articles on “promoting bacteria” “rhizobacteria” and “maize” from 1986 to 2024 (October 15).

Autor (año)	Titulo	DOI	Revista	Citas
Sandhya, Shaik, Grover, Reddy y Venkateswarlu (2010)	Effect of plant growth promoting <i>Pseudomonas</i> spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress	10.1007/s10725-010-9479-4	Plant Growth Regulation	492
Hungria, Campo, Souza y Pedrosa (2010)	Inoculation with selected strains of <i>Azospirillum brasilense</i> and <i>A. lipoferum</i> improves yields of maize and wheat in Brazil	10.1007/s11104-009-0262-0	Plant and Soil	417
Egamberdiyeva (2007)	The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils	10.1016/j.apsoil.2007.02.005	Applied Soil Ecology	413
Rojas-Tapias et al. (2012)	Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (<i>Zea mays</i>)	10.1016/j.apsoil.2012.01.006	Applied Soil Ecology	352
Kennedy et al. (2004)	Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: Can their potential for plant growth promotion be better exploited?	10.1016/j.soilbio.2004.04.006	Soil Biology and Biochemistry	326
Naseem and Bano (2014)	Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize	10.1080/17429145.2014.902125	Journal of Plant Interactions	306
Hameeda, Harini, Rupela, Wani y Reddy (2008)	Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna	10.1016/j.micres.2006.05.009	Microbiological Research	295
Chabot, Antoun y Cescas (1996)	Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing <i>Rhizobium leguminosarum</i> biovar. <i>phaseoli</i>	10.1007/BF00010460	Plant and Soil	285
Cohen, Travaglia, Bottini y Piccoli (2009)	Participation of abscisic acid and gibberellins produced by endophytic <i>Azospirillum</i> in the alleviation of drought effects in maize	10.1139/B09-023	Botany	278
Marques, Pires, Moreira, Rangel y Castro (2010)	Assessment of the plant growth promotion abilities of six bacterial isolates using <i>Zea mays</i> as indicator plant	10.1016/j.soilbio.2010.04.014	Soil Biology and Biochemistry	271

DOI = Digital Object Identifier (Identificador de Objeto Digital).

DOI = Digital Object Identifier (Identificador de Objeto Digital).

El cuarto clúster, la fijación de nitrógeno en plantas, estuvo dominado por estudios pioneros sobre bacterias diazotróficas del género *Azospirillum*. Las investigaciones de *Azospirillum* en gramíneas confirmaron la capacidad de estas bacterias para mejorar el desarrollo radicular y la eficiencia en el uso de nitrógeno, reduciendo la dependencia de fertilizantes sintéticos y marcando un punto de inflexión hacia la adopción de biofertilizantes en sistemas agrícolas más sostenibles (Okon y Labandera-González, 1994; Boddey y Döbereiner, 1995; Basha et al., 2004). Este avance representó un punto de inflexión hacia la adopción de biofertilizantes en sistemas agrícolas más sostenibles. De igual manera, Boddey y Döbereiner (1995) demostraron que las bacterias del género *Azospirillum* pueden fijar nitrógeno atmosférico y transferirlo parcialmente a la planta hospedera, lo que reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos. Estas investigaciones confirmaron que la fijación simbiótica no es exclusiva de las leguminosas, lo que abrió una línea de estudio que posteriormente se integró en el desarrollo de biofertilizantes.

Por último, el quinto clúster, la solubilización de fosfatos con *Pseudomonas*, cobró relevancia a finales de los años noventa, cuando se demostró que ciertas cepas bacterianas pueden liberar fósforo inorgánico del suelo mediante la producción de ácidos orgánicos. Trabajos como los de Rodríguez y Fraga (1999) fueron fundamentales para describir los mecanismos moleculares implicados, identificando a *Pseudomonas* y *Bacillus* como los géneros más eficientes. Más adelante, Vyas y Gulati (2009) y Martínez et al. (2019), demostraron que la inoculación con *Pseudomonas fluorescens* incrementa la disponibilidad de fósforo y mejora el crecimiento del maíz en condiciones controladas. Fankem et al. (2008) y Rodríguez, Fraga, González y Bashan (2006) demostraron que cepas de *Pseudomonas fluorescens* y *P. poae* pueden liberar fósforo inorgánico mediante la producción de ácidos orgánicos, lo que incrementa la absorción de nutrientes y el crecimiento de plantas de maíz. Además, el análisis genómico reveló la presencia de genes *gcd* y *pqqE*, esenciales para esta actividad, lo que marcó el inicio del enfoque molecular en el estudio de rizobacterias solubilizadoras.

El análisis temático del periodo 2015-2024 revela una clara evolución en el enfoque de la investigación sobre rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en maíz, que pasa de estudios descriptivos a una integración biotecnológica y ecológica orientada a la sostenibilidad agrícola. Los cinco clústeres identificados sintetizan las principales líneas de avance científico en torno a la aplicación de inoculantes microbianos, la fijación biológica de nitrógeno, el metabolismo microbiano, la tolerancia al estrés, el control biológico y la calidad del suelo (Figura 4).

En el clúster verde, centrado en inoculantes y fijación biológica de nitrógeno, se observa un creciente énfasis en el uso de *Azospirillum* como biofertilizante clave. Galindo *et al.* (2018) demostraron que la inoculación con *Azospirillum brasilense* combinada con fertilización nitrogenada incrementó significativamente el rendimiento de grano en maíz y la biomasa total, reduciendo hasta en 30% la necesidad de fertilizante sintético. De manera complementaria, García *et al.* (2023) reportaron que *Azospirillum argentinense* (Az19) mejoró la tolerancia al déficit hídrico en un 20-25%, mediante el aumento de la conductancia estomática y del contenido relativo de agua foliar. Estos resultados confirman la capacidad de los inoculantes microbianos para optimizar la eficiencia en el uso del nitrógeno y mejorar la resiliencia de las plantas, aspectos fundamentales para la agricultura sostenible.

El clúster amarillo, enfocado en biotecnología y metabolismo microbiano, mostró avances en la caracterización funcional de cepas con múltiples rasgos promotores del crecimiento. Bal, Das, Dangar y Adhya (2013) describieron que cepas con producción simultánea de IAA, sideróforos y ACC desaminasa presentaron incrementos en la biomasa radicular respecto a los controles. De manera similar, Khourchi *et al.* (2022) destacaron que bacterias solubilizadoras de fostato (PSB) y fertilizante polifosfato, reportando incrementos de fosfatasa del orden de 213% y 219% en suelo según el tratamiento, y aumentos de fósforo en raíces y otros parámetros.

En el clúster azul, centrado en el estrés abiótico y la tolerancia ambiental, las investigaciones se orientan a mecanismos fisiológicos y moleculares mediados por PGPR. Ali *et al.* (2022) demostraron que la inoculación con *Enterobacter cloacae* PM23 incrementó la longitud de brote entre 21-36%, la biomasa seca hasta 58 %, y los niveles de clorofilas en más de 30% bajo condiciones de salinidad, además de modular la expresión de genes antioxidantes. Resultados similares fueron obtenidos por Shabaan *et al.* (2022), quienes reportaron aumentos en la actividad enzimática del suelo (ureasa + 72 %, deshidrogenasa + 72 %) y altas correlaciones entre estas variables y el contenido de nutrientes ($r > 0.9$), lo que refuerza el papel de los PGPR en la mitigación del estrés salino y en la restauración de la salud del suelo.

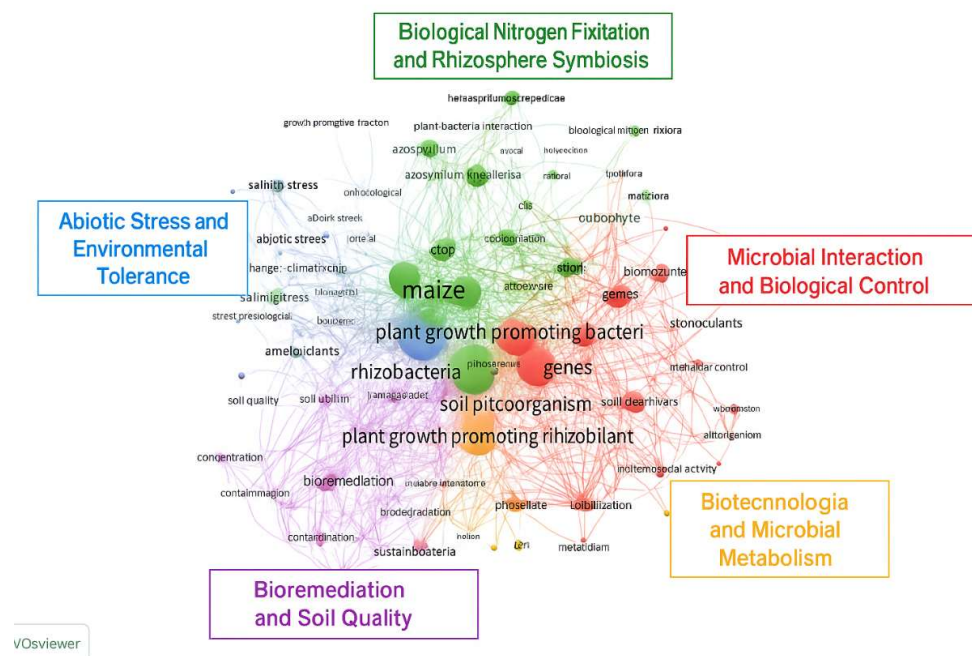


Figura 4. Visualización “plant growth -promoting rhizobacteria” y “maize” de 2015 a 2024.
Figure 4. Visualization “plant growth -promoting rhizobacteria” and “maize” from 2015 to 2024.

El clúster rojo, asociado con la interacción microbiana y el control biológico, evidencia una tendencia al uso de consorcios microbianos. Guardiola-Márquez, Figueroa, Pacheco y Senés (2021) demostraron que la interacción de consorcios bacterianos con diferentes variedades de maíz modificó la colonización rizosférica, incrementaron la biomasa vegetal, redujeron la incidencia de patógenos fúngicos y la respuesta de crecimiento. Estos hallazgos sugieren que la compatibilidad genotipo-microbiota es un factor clave para la eficiencia de las aplicaciones bioinoculantes.

Finalmente, el clúster morado, que integra rizobacterias, biorremediación y calidad del suelo, resalta la multifuncionalidad ecológica de las PGPR. Nosheen *et al.* (2018) y Liu *et al.* (2023), demostraron que cepas de *Pseudomonas* solubilizadoras de fósforo no solo mejoran la absorción de nutrientes, sino también la actividad enzimática y la biodiversidad microbiana del suelo. Este tipo de hallazgos confirma que los inoculantes pueden contribuir a la restauración de suelos degradados y al mantenimiento de su funcionalidad ecológica.

La evidencia revisada sugiere que el campo de estudio de las PGPR en maíz ha transitado de enfoques unidimensionales a sistemas de interacción compleja, donde el suelo, el genotipo vegetal y el microbioma rizosférico conforman una red dinámica. La consolidación de investigaciones que integren la fisiología vegetal, la genómica microbiana y la ecología del suelo es fundamental para traducir el potencial biotecnológico de las PGPR en soluciones aplicables a la agricultura sustentable.

Los inóculos bacterianos contribuyen al desarrollo de las plantas mediante múltiples mecanismos, como la promoción del crecimiento vegetal, la aceleración de la germinación, la mejora de la emergencia de plántulas, el aumento de la tolerancia al estrés abiótico, la protección contra enfermedades y el estímulo del crecimiento radicular (Lugtenberg, Chin-A-Woeng y Bloemberg, 2002; Egamberdiyeva, 2007). Las PGPR, en particular, favorecen el desarrollo vegetal mediante la síntesis de fitohormonas, la producción de sideróforos, la solubilización de fósforo insoluble y la fijación biológica de nitrógeno, lo que las posiciona como una alternativa eficaz y sostenible frente a los fertilizantes químicos (Yu *et al.*, 2022). Estas funciones han sido ampliamente documentadas en diversos géneros bacterianos.

Azospirillum

Las bacterias del género *Azospirillum* han demostrado efectos positivos en el crecimiento del maíz, principalmente por los cambios fisiológicos que inducen en las raíces, favoreciendo la absorción de agua y nutrientes; estas modificaciones en el desarrollo y la función radicular, en muchos casos, incrementan el rendimiento del cultivo (Okon y Kapulnik, 1986), tal como lo probaron Hungría, Campo, Souza y Pedrosa (2010) con diferentes cepas de *A. brasilense* y aumentaron el peso de grano en maíz de 662-823 kg ha⁻¹ ó entre 24-30%, en relación con los controles no inoculados. Además, la liberación de ácidos orgánicos por parte de bacterias puede llegar a solubilizar fosfatos de calcio (Rodríguez, González, Goire, y Bashan, 2004), y estimula la resistencia de las plantas a estrés abiótico (Fukami, De la Osa, Ollero, Megías y Hungría, 2018; Freitas, Barbosa, Zuffo, y Steiner, 2021; Guidinelle *et al.*, 2024).

A. brasilense, ha mostrado mejoras en altura de planta y peso seco de raíz con incrementos del 12 y 18% respectivamente (Villa-Castro, Mayek-Pérez, García-Olivares, y Hernández-Mendoza, 2014); así como un mayor rendimiento en grano en comparación con los tratamientos sin inoculación y con fertilización nitrogenada, incrementando en 35 % el rendimiento de grano en maíz (González-Huerta, *et al.*, 2011; García-Olivares, Mendoza y Mayek, 2012). Datos similares obtuvieron Condori *et al.* (2024) al realizar inoculaciones con *A. brasilense* y visualizaron un aumento significativo de 10.5% en altura de planta, 16.7% en la longitud de la raíz, 21.3% de biomasa fresca aérea, 30.1% en biomasa fresca de la raíz y 27.7% en la concentración de nitrógeno foliar y con respecto al rendimiento y peso de la mazorca en un 21% y 11%, respectivamente, en comparación con plantas no inoculadas.

Además, se ha reportado un incremento del 17% en la longitud promedio de las espigas y en la productividad, en comparación con plantas no inoculadas (Pedraza *et al.*, 2010). Este efecto se atribuye a la afinidad del microorganismo con el sistema radicular de la planta (Rangel-Lucio *et al.*, 2011; Frioni, 2006).

A. irakense también se ha utilizado como biofertilizante, como lo reportaron Dobbelaere *et al.* (2001) en maíz en donde la inoculación de plantas con la cepa KBC1 de *A. irakense* promovió un mayor desarrollo en comparación con el testigo, registrándose incrementos del 8.7% en la longitud de las plantas y del 16.2% en peso de grano, asimismo, se observó un aumento del 10% en el número de raíces y del 24% en el peso seco de la raíz; en el mismo estudio, *A. brasilense* mostró incrementos en el rendimiento de grano de entre 0.7 y 1.0 Mg ha⁻¹ (50-95%) al aplicarse en combinación con bajas dosis de nitrógeno (18 y 46 kg ha⁻¹), considerando que la dosis convencional de fertilización es de 170 kg N ha⁻¹. Sin embargo, a dosis más elevadas de nitrógeno, el efecto positivo se redujo, hasta el punto de limitar el rendimiento.

Otras especies, como *A. lipoferum* y *A. indigens* también han mejorado la producción de maíz, aunque la magnitud del beneficio depende de la cepa y del cultivar (Riggs, Chelius, Iniguez, Kaeppler, y Triplett, 2001). Por ejemplo, el genotipo W64a incrementó el rendimiento de grano en 13%, mientras que el genotipo B73 logró un aumento del 25% (El-Komy, Moharram y Safwat, 1998). Según Karpatai *et al.* (1999), evaluaron dos genotipos de *Azospirillum*, encontrando que contribuye a la fijación biológica de nitrógeno (FBN) dependiendo del genotipo, así, *A. lipoferum* fijó entre el 26.5% y el 31.4% del nitrógeno atmosférico en el genotipo H.II Giza215, mientras que *A. brasilense* alcanzó sólo el 17.5% en las mismas condiciones y en el genotipo H.III Giza310, *A. lipoferum* logró un porcentaje de fijación de nitrógeno de 17.4-20.6%, frente al 6.1% de *A. brasilense*, evidenciando el potencial para cubrir al menos el 17% de los requerimientos de nitrógeno del cultivo (Karpatai *et al.*, 1999).

Actualmente, nuevas líneas de investigación se enfocan en identificar cepas capaces de resistir el estrés hídrico y salino. Da Cunha, Pedrolo y Arisi (2024) evaluaron cepas de *A. brasilense* (Ab-V5 y Ab-V6) que mostraron potencial de osmoadaptación y mejor supervivencia celular tras la inoculación en plantas de maíz, abriendo oportunidades para su uso en condiciones de estrés ambiental

Pseudomonas

Los miembros del género *Pseudomonas* son reconocidos como componentes clave de los microbiomas rizosféricos, donde contribuyen al crecimiento y la salud de las plantas (Agaras *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2024). Este género tiene diversas aplicaciones agrícolas, entre ellas la tolerancia al estrés hídrico. Kálmán, Nagy, Berényi, Kiss y Posta (2024) analizaron los rasgos fisiológicos de plantas sometidas a sequía tratadas PGPR, entre ellas *Pseudomonas putida* y *P. fluorescens*, en donde *P. putida* destacó por su elevada producción de ortofosfato soluble ($51.636 \mu\text{g cm}^{-3}$) y una mejora significativa en la relación peso fresco/seco y en el contenido de materia seca en comparación con el control, logrando también un rendimiento superior en grano donde obtuvo 6.278 Mg ha^{-1} en comparación con el testigo 5.468 megagramo por hectárea.

Rojas-Sanchez, Castelán-Sánchez, Garfías-Zamoray Santoyo (2024) reportaron que la inoculación de *P. fluorescens* UM270 en cultivo de maíz bajo sistema de milpa tradicional, estimuló funciones como la síntesis de trehalosa, la asimilación de amonio y el metabolismo de poliaminas, además de modificar positivamente los microbiomas rizosféricos y endofíticos, contribuyendo al crecimiento y la salud de las plantas en sistemas agroecológicos.

De forma más específica, Sandhya Shaik, Grover, Reddy y Venkateswarlu (2010) demostraron que cinco cepas de *Pseudomonas* spp. tolerantes a la sequía mejoraron la biomasa, el potencial hídrico foliar y el estado antioxidante en plántulas de maíz, destacando *P. putida* GAP-P45 como la más eficaz en reducir el estrés oxidativo y mejorar la tolerancia al déficit hídrico.

Siguiendo esta línea de investigación Rai, Sabharwal, Singh, Yadav y Choure (2024) evaluaron tres cepas de PGPR resistentes a sequía simulada con cepas, entre ellas *P. fluorescens* PKR1, y reportaron mejoras del 40-50% en la germinación del maíz, aumento en la actividad de enzimas antioxidantes y una notable reducción del daño oxidativo; estos hallazgos posicionan a *Pseudomonas* como un biofertilizante prometedor para fortalecer la resiliencia de los cultivos frente al estrés hídrico.

Bacillus

Las bacterias del género *Bacillus* pueden formar esporas, lo que les permite sobrevivir en condiciones ambientales adversas y se han estudiado ampliamente por su capacidad para estimular el crecimiento de las plantas, lo que las convierte en una alternativa sostenible a los fertilizantes químicos (López-Valenzuela *et al.*, 2019). Además, en las plantas brindan protección contra plagas y enfermedades (Chattopadhyay, 2006). Orozco-Mosqueda *et al.* (2021) sugieren que un formulado de *Bacillus* y en la dosis adecuada puede sustituir parcialmente a los fertilizantes químicos, haciendo el sistema de producción de maíz más sostenible y económico.

Marques, Pires, Moreira, Rangel y Castro (2010) evaluaron los brotes con diferentes aislados y los niveles de P (fosforo) variaron de 251 (en el control) a 802 mg kg^{-1} (en el tratamiento con la cepa *Ralstonia* codificado como 1C2), promoviendo la acumulación de P en los brotes en comparación con las plantas control.

Recientes líneas de investigación se han centrado en contrarrestar el estrés abiótico, particularmente la sequía. En este contexto, Peñas-Corte *et al.* (2024) evaluaron los efectos sinérgicos de *Bacillus velezensis* A6 en combinación con un extracto vegetal de plantas de la familia Lamiales sobre el crecimiento de maíz y su resistencia al estrés hídrico, el tratamiento incrementó significativamente la altura de las plantas (32.87%) y el rendimiento del cultivo (62.93%), además de reducir los niveles de fumonisinas; estos resultados subrayan la eficacia de los bioestimulantes microbianos y botánicos, destacando que su aplicación combinada puede fortalecer la productividad y la resiliencia de los cultivos ante condiciones ambientales adversas.

Algunas cepas de *Bacillus* presentan un doble efecto como agentes de control biológico y promotores del crecimiento vegetal (Hungria et al., 2010). Wang et al. (2024) evaluaron *B. amyloliquefaciens* en el manejo del tizón foliar del maíz del norte (NCLB), causado por *Exserohilum turcicum*, el tratamiento con extractos crudos (80 mg L⁻¹ en remojo de semillas y 40 mg L⁻¹ en irrigación radicular) redujo la incidencia de la enfermedad y también estimuló significativamente el crecimiento de las plántulas. El estudio resalta el potencial de los extractos microbianos, especialmente en combinación con piraclostrobina, como estrategia integrada para el manejo fitosanitario y el fortalecimiento del desarrollo temprano del maíz.

Azotobacter

Las bacterias del género *Azotobacter* destacan por su capacidad para fijar nitrógeno de forma libre, solubilizar fósforo y producir diversos compuestos que favorecen la interacción entre los microorganismos y las plantas; este género contribuye a mantener e incrementar el contenido de nitrógeno disponible en el suelo (Reyes, Álvarez, El-Ayoub y Valery, 2008). Diversos estudios han evidenciado los beneficios de *Azotobacter* spp.; por ejemplo, Sánchez-Yáñez, Auala, Moreno y Arias (2014) demostraron que la inoculación de semillas de maíz con *Azotobacter* sp. en suelos sódicos con bajo contenido de materia orgánica elevó la tasa de germinación al 95%, frente al 85% observado en las semillas no inoculadas.

En la misma línea de investigación, Rojas-Tapias et al. (2012) demostraron que cepas de *Azotobacter* (C5 y C9), estrechamente relacionadas con *A. chroococcum* según análisis de secuencias de ADNr 16S, pueden atenuar el estrés salino en maíz al ser inoculadas en raíces cultivadas en suelos esterilizados con diferentes concentraciones de NaCl (2.93 y 5.85 g kg⁻¹). Los resultados evidenciaron una mejora parcial en la tolerancia al estrés, mediada por diversos mecanismos fisiológicos inducidos por las bacterias. Estos hallazgos refuerzan la idea de que las PGPR constituyen una herramienta biotecnológica sostenible, en especial, para optimizar el rendimiento de los cultivos en suelos salinos.

Investigaciones Emergentes

El microbioma asociado al maíz ha sido ampliamente caracterizado en distintos contextos ambientales, incluyendo el pH y tipo de suelo (Erel et al., 2017; Rudolph-Mohr, Tötze, Kardjilov y Oswald, 2017), así como en diferentes genotipos y variedades (Li et al., 2022). Además, se ha estudiado su distribución en zonas específicas de interacción con la planta, como la rizosfera (Peiffer y Ley, 2013a), la endosfera (Correa-Galeote, Bedmar y Arone, 2018) y la filosfera (Chen, An, Zheng, Ma y Su, 2018). Estos estudios revelan que la estructura microbiana del maíz es altamente dinámica y responde tanto a factores edáficos como genéticos.

De acuerdo con los documentos más citados, diversos estudios demuestran que la inoculación con rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB), como *Bacillus* spp. y *Azospirillum brasilense*, puede disminuir la necesidad de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, contribuyendo así a una agricultura más sostenible y a la reducción de la contaminación ambiental.

En particular, la rizosfera ha demostrado ser un nicho microbiano sensible al genotipo del hospedante, con una composición que también puede verse modificada por prácticas agronómicas como la fertilización orgánica e inorgánica (Velasco-Jiménez, Castellanos, Acevedo, Aarland y Rodríguez, 2020). Peiffer et al. (2013b) confirmaron esta relación al analizar la diversidad bacteriana en la rizosfera de 27 líneas endogámicas de maíz moderno cultivadas en condiciones de campo, observaron una clara influencia genética sobre la comunidad microbiana. Estos hallazgos destacan la relevancia de integrar el conocimiento del microbioma en programas de mejoramiento genético y en el diseño de estrategias agrícolas sostenibles.

Las PGPR cumplen funciones esenciales en el maíz, actúan como biofertilizantes, bioestimulantes y agentes de control biológico. Su inoculación mejora el crecimiento y rendimiento del cultivo, incluso bajo estrés abiótico como la sequía; además, algunas cepas protegen contra patógenos mediante antibiosis, competencia por recursos, actividad de ACC desaminasa y la activación de defensas inmunes en la planta (Khatoon et al., 2020).

Se ha documentado que algunas bacterias alojadas en los nódulos de las raíces en leguminosas son capaces de fijar nitrógeno atmosférico convirtiéndolo en formas asimilables por las plantas (Van Deynze et al., 2018). En contraste, los cultivos no leguminosos, como los cereales, carecen de esta simbiosis natural y dependen en gran medida del uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Tena, 2018). No obstante, la revisión de la base de datos Scopus revela una escasa atención a la microbiota adaptada a condiciones locales en maíces nativos de regiones específicas de México. Esta brecha subraya la necesidad de avanzar en investigaciones dirigidas a identificar o desarrollar mecanismos de fijación biológica de nitrógeno atmosférico asociados a este cultivo, una línea de trabajo prioritaria desde hace varias décadas.

Uno de los hallazgos más sobresalientes sobre esta línea de investigación es el de Van Deynze *et al.* (2018), que plantearon la hipótesis que las razas autóctonas aisladas de maíz cultivadas mediante prácticas tradicionales con poco o ningún fertilizante podrían haber desarrollado estrategias para mejorar el rendimiento de las plantas en condiciones de bajo contenido de nitrógeno. Estudiaron una raza local de maíz, cultivada en campos con déficit de nitrógeno en la región Sierra Mixe de Oaxaca, México, y encontraron que entre el 29% y el 82% del nitrógeno de la planta provenía del nitrógeno atmosférico. Los altos niveles de fijación de nitrógeno se sustentaron, en la abundante producción de un mucílago rico en azúcar asociado con las raíces aéreas que funciona como reservorio de un microbioma complejo fijador de nitrógeno (Van Deynze *et al.*, 2018).

Higdon *et al.* (2020a) continuaron con la investigación con los maíces de la Sierra Mixe de Oaxaca, examinando cada genoma diazotrofo hospedado en el mucílago para detectar la presencia de genes *nif* esenciales para la fijación de nitrógeno (*nifHDKENB*) y de utilización de carbohidratos relevantes para la digestión de polisacáridos, seleccionaron casi 600 microbios de una colección obtenida y confirmaron su capacidad para incorporar metabolitos pesados de nitrógeno, identificando diazotrofos que poseían los operones canónicos del gen *nif*, así como muchas otras configuraciones de operones con fijación y liberación concomitantes de más de 700 metabolitos diferentes marcados con ^{15}N .

Un caso particular, es la bacteria *Raoultella* spp., codificada como BCW-201900 derivada del mucílago del maíz autóctono de la Sierra Mixe, Oaxaca, confirió promoción directa del crecimiento vegetal (PGP) al maíz convencional bajo estrés severo por nitrógeno. El análisis de las mediciones de altura promedio para los grupos inoculados en comparación con el control, reveló diferencias significativas para los aumentos de altura. Las plantas inoculadas exhibieron aumentos de altura promedio superando al tratamiento control con 20.5 cm a las 4 semanas, 21.6 cm a las 7 semanas y 60.4 cm después de 8 semanas en el invernadero (Higdon *et al.*, 2020b).

Por su parte, Bennett, Pankievicz y Ané (2020) propusieron un modelo general de fijación biológica de nitrógeno en cereales basado en esta asociación planta-microbiota, sugirieron que otras gramíneas como trigo, sorgo y cebada podrían presentar mecanismos similares. Identificaron las cuatro funcionalidades principales de dicha asociación diazotrofa productiva: 1) la descomposición del polisacárido del mucílago; 2) el uso de azúcares simples liberados para alimentar la actividad nitrogenasa, 3) la reducción de oxígeno en el entorno del mucílago, 4) el mantenimiento de bajos niveles de nitrógeno en ese ambiente. Destacó el potencial de transferir esta capacidad a variedades comerciales mediante el mejoramiento genético o la ingeniería microbiana.

Sin duda alguna, estos hallazgos de bacterias diazotróficas encontradas en maíz autóctono han sido un parteaguas para diferentes líneas de investigación. Se ha descubierto una forma de buscar microorganismos que sirvan como promotores de crecimiento no solo en maíz, sino en otros cultivos. En el estudio de Pang *et al.* (2023), se aplicó una metodología centrada en el análisis del fenómeno de fijación de nitrógeno mediada por la microbiota presente en el mucílago de la raíz de *Heterotis rotundifolia* ("La Dama Rosa"). Durante el proceso de caracterización microbiana, los autores identificaron de manera colateral un hongo del género *Aspergillus*, específicamente *A. terreus*, aislado del mucílago, el cual mostró una destacada actividad antimicrobiana de amplio espectro frente a bacterias y hongos patógenos como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Candida albicans* y *Fusarium oxysporum*, pero que permite el crecimiento selectivo de bacterias diazotróficas.

Del mucílago de maíz de la Sierra Mixe, Oaxaca, Higdon *et al.* (2020a) aislaron y secuenciaron cerca de 500 bacterias fijadoras de N_2 , agrupadas en tres clados funcionales con base en genes de fijación para probar su desempeño en el cultivo de papa. Estos aislados mostraron marcadores genómicos para múltiples mecanismos de PGP, como la biosíntesis de ácido indol-3-acético (AIA), desaminación de ácido 1-amino-1-ciclopropanocarboxílico (ACC) y solubilización de fosfato; sus ensayos *in vitro* e *in planta* identificaron 16 candidatos bioestimulantes que promovieron el crecimiento aumentando la acumulación de biomasa de los brotes (301.07%) y biomasa de la raíz (292.79%) respecto al control.

Por último, Connolly *et al.* (2025) evaluaron 21 razas criollas originarias de México, junto con tres variedades mejoradas (dos de EE. UU. y una de Perú), con y sin fertilización, midieron crecimiento, la producción de raíces aéreas y la fijación de N_2 mediante el método de abundancia natural de nitrógeno (^{15}N). Las accesiones mostraron una variabilidad significativa, con valores de fijación de N atmosférico de hasta un 36%, asociados positivamente con el número de nudos con raíces aéreas. Sus resultados sugieren que la capacidad de fijación de N no es exclusiva del maíz de la Sierra Mixe, sino que se distribuye entre razas criollas, lo que constituye un recurso genético valioso para la agricultura sostenible.

Lo anterior se relaciona con lo reportado por Pankievicz *et al.* (2022), quienes identificaron una correlación entre el diámetro de la raíz, el volumen de mucílago producido y la capacidad de fijar nitrógeno. También se ha observado que los agricultores que gestionan la diversidad genética en un centro de cultivo de origen han preservado caracteres esenciales para las simbiosis biológicas que contribuyen a satisfacer los requerimientos nutricionales del maíz (Guerrero-Calero, Romero-Añazco, Salvatierra-Pilozo, Barbán-Forte y Cabrera-Verdesoto, 2025).

El uso de la capacidad de fijación de N, así como la producción de raíces aéreas y la secreción de mucílago en las razas locales mexicanas puede ser más relevante para los agricultores y las comunidades que administran y cultivan estas accesiones *in situ* (Gao *et al.*, 2023). En este contexto, se considera que los agricultores que mantienen la diversidad genética en los centros de origen del maíz han conservado rasgos clave para establecer simbiosis biológicas que favorecen su nutrición (Massieu-Trigo y Lechuga-Montenegro, 2002).

Hasta el momento, solo un número limitado de accesiones de maíces criollos ha sido evaluado, principalmente en entidades como Oaxaca, Chiapas, Estado de México, Tlaxcala, Aguascalientes y Puebla. Sin embargo, México alberga un amplio reservorio de genotipos locales, entre los cuales destaca el estado de Veracruz, donde se han documentado al menos 18 razas nativas de maíz, lo que resalta su relevancia como fuente de diversidad genética con potencial agrobiotecnológico (Sierra-Macías *et al.*, 2014; Bada-Carbajal, Osorio-Antonia y Ramírez-Hernández, 2021; Tinoco, 2022).

En la región de Veracruz, se cultivan diversas razas nativas de maíz, siendo Tuxpeño, Olotillo y Ratón las de mayor uso entre los productores locales. Se siembran en parcelas de pequeña escala, con superficies que oscilan entre 0.5 y 2.0 hectáreas, alcanzan rendimientos promedio de 1.5 a 3.0 toneladas por hectárea y el destino principal de la producción es el autoconsumo familiar, con la comercialización de excedentes en mercados locales (Tinoco, 2022).

CONCLUSIONES

Esta revisión bibliométrica examinó el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en el cultivo de maíz, analizando la evolución de las publicaciones, actores clave, términos frecuentes y temas predominantes en los estudios más citados. Aunque el conocimiento sobre la microbiota vegetal data del siglo XIX, fue hasta la década de 1980 cuando se consolidó el interés científico en este campo.

Las PGPR han demostrado su capacidad para mejorar el crecimiento, la resiliencia al estrés, la salud del maíz y, lo más importante, aumentar el rendimiento, ya que para los productores sigue siendo la variable más importante, aunque su efectividad en condiciones de campo aún representa un desafío. Se plantea la necesidad de impulsar prácticas agrícolas que favorezcan microbiotas funcionales y estrategias de fitomejoramiento centradas en la interacción planta-microbioma.

Las fuentes bibliográficas revelan que las PGPRs pueden aumentar hasta 30 kg de nitrógeno y 20 kg de fósforo por hectárea, incluso aumentando la producción entre un 35% y 58%. También promueven el desarrollo radicular e incrementan la biomasa hasta un 68%. No obstante, en condiciones de sequía, las plántulas inoculadas mostraron menores niveles de actividad enzimática, lo que indica una respuesta de estrés más controlada.

Además, se destaca la importancia de conservar la diversidad genética del maíz y de investigar aspectos como la absorción de nitrógeno, las comunidades microbianas en raíces aéreas y los factores que regulan la secreción de mucílago, para optimizar la fijación biológica de nitrógeno (FBN).

Esto abre una ventana de oportunidad y línea de investigación para la identificación y caracterización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) asociadas a maíces nativos en el estado de Veracruz, donde las condiciones agroecológicas y prácticas tradicionales de cultivo muestran paralelismos con los observados en la Sierra Mixe, Oaxaca. La adaptación de razas criollas a suelos de baja fertilidad y su manejo con escasa dependencia de insumos externos favorecen la formación de comunidades microbianas con potencial biofertilizante. Explorar el microbioma rizosférico y endófito de estos maíces ofrece una vía sostenible para desarrollar biotecnologías que incrementen la productividad sin afectar el equilibrio del agroecosistema.

Finalmente, se subraya la necesidad de desarrollar formulaciones y métodos de aplicación más eficaces, acompañados de investigaciones que faciliten su implementación en sistemas agrícolas reales como el monocultivo y la milpa. Abordar estos desafíos desde un enfoque interdisciplinario será fundamental para maximizar el impacto de las PGPR en una agricultura más sostenible.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Beca académica de posgrado otorgada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: J.J.S.J. y F.H.R.; Investigación: J.J.S.J. y F.H.R.; Metodología: J.J.S.J.; Software: J.J.S.J.; Análisis formal: J.J.S.J.; Curación de datos: J.J.S.J.; Escritura – preparación del borrador original: J.J.S.J., F.H.R., M.E.M.C., J.A.H.C. y M.S.M.; Escritura – revisión y edición: J.J.S.J., F.H.R. y M.E.M.C.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Colegio de Postgraduados (COLPOS) campus Córdoba y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca académica de posgrado otorgada (J.J.S.J.).

LITERATURA CITADA

- Adebisi, M. A., Kehinde, T. O., Porbeni, J. B. O., Oduwaye, O. A., Biliaminu, K., & Akintunde, S. A. (2014). Seed and seedling vigour in tropical maize inbred lines. *Plant Breeding and Seed Science*, 67, 1-16. <https://doi.org/10.2478/v10129-011-0072-4>
- Agaras, B. C., Scandiani, M., Luque, A., Fernández, L., Farina, F., Carmona, M., ... & Valverde, C. (2015). Quantification of the potential biocontrol and direct plant growth promotion abilities based on multiple biological traits distinguish different groups of *Pseudomonas* spp. isolates. *Biological Control*, 90, 173-186. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.07.003>
- Ali, B., Wang, X., Saleem, M. H., Sumaira, Hafeez, A., Afridi, M. S., ... & Ali, S. (2022). PGPR-mediated salt tolerance in maize by modulating plant physiology, antioxidant defense, compatible solutes accumulation and bio-surfactant producing genes. *Plants*, 11(3), 345. <https://doi.org/10.3390/plants11030345>
- Bada-Carbajal, L. M., Osorio-Antonia, J., & Ramírez-Hernández, Z. (2021). Evolución de la producción del maíz en Veracruz, México. *Investigación Administrativa*, 50(128), 1-16.
- Bal, H. B., Das, S., Dangar, T. K., & Adhya, T. K. (2013). ACC deaminase, IAA and siderophore-producing bacteria: effects on root elongation and growth of rice seedlings. *Journal of Basic Microbiology*, 53(12), 972-984. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200445>
- Bashan, Y., Holguin, G., & de Bashan, L. E. (2004). *Azospirillum*-plant relationships: environmental and physiological advances (1997-2003). *Canadian Journal of Microbiology*, 50(8), 521-577. <https://doi.org/10.1139/w04-035>
- Bennett, A. B., Pankievicz, V. C. S., & Ané, J. M. (2020). Model for nitrogen fixation in cereal crops. *Trends in Plant Science*, 25(3), 226-235. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.12.004>
- Boddey, R. M., & Döbereiner, J. (1995). Nitrogen fixation associated with grasses and cereals: Recent progress and perspectives for the future. *Fertilizer Research*, 42, 241-250. <https://doi.org/10.1007/BF00750517>
- Chabot, R., Antoun, H., & Cescas, M. P. (1996). Growth promotion of maize and lettuce by phosphate-solubilizing *Rhizobium leguminosarum* biovar. phaseoli. *Plant and Soil*, 184, 311-321. <https://doi.org/10.1007/BF00010460>
- Chattopadhyay, M. K. (2006). Mechanism of bacterial adaptation to low temperature. *Journal of Biosciences*, 31(1), 157-165. <https://doi.org/10.1007/BF02705244>
- Chen, Q. L., An, X. L., Zheng, B. X., Ma, Y. B., & Su, J. Q. (2018). Long-term organic fertilization increased antibiotic resistome in phyllosphere of maize. *Science of the Total Environment*, 645, 1230-1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.260>
- Cohen, A. C., Travaglia, C. N., Bottini, R., & Piccoli, P. N. (2009). Participation of abscisic acid and gibberellins produced by endophytic *Azospirillum* in the alleviation of drought effects in maize. *Botany*, 87(5), 455-462. <https://doi.org/10.1139/B09-023>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Journal of Advanced Research*, 20(19), 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Condori, T., Alarcón, S., Huasasquiche, L., García-Blásquez, C., Padilla-Castro, C., Velásquez, J., & Solórzano, R. (2024). Inoculation with *azospirillum* brasilense as a strategy to reduce nitrogen fertilization in cultivating purple maize (*Zea mays* L.) in the Inter-Andean Valleys of Peru. *Microorganisms*, 12(10), 2107. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12102107>
- Connolly, L. N., Lorenz, N., Maleki, K., Kayafas, N., Dick, R. P., & Mercer, K. L. (2025). Nitrogen fixation rates and aerial root production among maize landraces. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1502884. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1502884>
- Correa-Galeote, D., Bedmar, E. J., & Arone, G. J. (2018). Maize endophytic bacterial diversity as affected by soil cultivation history. *Frontiers in Microbiology*, 9, 484. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00484>

- Da Cunha, E. T., Pedrolo, A. M., & Arisi, A. C. M. (2024). Thermal and salt stress effects on the survival of plant growth-promoting bacteria *Azospirillum brasilense* in inoculants for maize cultivation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(9), 5360-5367. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13366>
- Dobbelaere, S., Croonenborghs, A., Thys, A., Ptacek, D., Vanderleyden, J., Dutto, P., ... & Okon, Y. (2001). Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28(9), 871-879. <https://doi.org/10.1071/PP01074>
- Egamberdiyeva, D. (2007). The effect of plant growth-promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied Soil Ecology*, 36(2-3), 184-189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.02.005>
- El-Komy, H. M. A., Moharram, T. M. M., & Safwat, M. S. A. (1998). Effect of *Azospirillum* inoculation on growth and N₂ fixation of maize subjected to different levels of FYM using 15N-dilution method. In *Nitrogen Fixation with Non-Legumes: Proceedings of the 7th International Symposium on Nitrogen Fixation with Non-Legumes, held 16-21 October 1996 in Faisalabad, Pakistan* (pp. 49-59). Dordrecht, Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5232-7_6
- Erel, R., Bérard, A., Capowiez, L., Doussan, C., Arnal, D., Souche, G., ... & Hinsinger, P. (2017). Soil type determines how root and rhizosphere traits relate to phosphorus acquisition in field-grown maize genotypes. *Plant and Soil*, 412, 115-132. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3127-3>
- Faith-Vargas, M., & Rivas-Solano, O. (2012). Obtención de un mejorador de suelos como subproducto de la digestión anaerobia de desechos orgánicos en el TEC. *Revista Tecnología en Marcha*, 25(3), 19-27. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i3.454>
- Fan, Y., An, T., Wang, Q., Yang, G., Huang, W., Wang, Z., ... & Tian, X. (2023). Non-destructive detection of single-seed viability in maize using hyperspectral imaging technology and multi-scale 3D convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1248598>
- Fankem, H., Ngo Nkot, L., Deubel, A., Quinn, J., Merbach, W., Etoa, F.-X., & Nwaga, D. (2008). Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by strains of *Pseudomonas fluorescens* isolated from acidic soils of Cameroon. *African Journal of Microbiology Research*, 2(7), 171-178.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2025). *Perspectivas de cosechas y situación*. Roma, Italia: FAO. <https://doi.org/10.4060/cd4597es>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistics). (2023). Situación Alimentaria Mundial. Consultado el 1 de mayo, 2025, desde <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistics). (2025a). FAO Statistics, Products by country. Consultado el 1 de mayo, 2025, desde https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistics). (2025b). FAO Statistics, fertilizers by nutrient. Consultado el 1 de mayo, 2025, desde https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country
- Freitas, G. D. S., Barbosa, G. F., Zuffo, A. M., & Steiner, F. (2021). Co-inoculation of peanut (*Arachis hypogaea* L.) with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* promotes greater tolerance to drought. *Research, Society and Development*, 9(7), e69973690. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3690>
- Frioni, L. (2006). *Microbiología: básica, ambiental y agrícola*. Universidad de la República, Facultad de Agronomía. https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/43984/1/FrioniLilianmicrobiologia_basica_ambiental_y_agricola.pdf
- Fukami, J., de la Osa, C., Ollero, F. J., Megías, M., & Hungria, M. (2018) Co-inoculation of maize with *Azospirillum brasilense* and *Rhizobium tropici* as a strategy to mitigate salinity stress. *Functional Plant Biology*, 45(3), 328-339. <https://doi.org/10.1071/FP17167>
- Gao, J., Feng, P., Zhang, J., Dong, C., Wang, Z., Chen, M., ... & Wu, J. (2023). Enhancing maize's nitrogen-fixing potential through ZmSBT3, a gene suppressing mucilage secretion. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(12), 2645-2659. <https://doi.org/10.1111/jipb.13581>
- Galindo, F. S., Teixeira-Filho, M. C. M., Buzetti, S., Ludkiewicz, M. G. Z., Rosa, P. A. L., & Tritapepe, C. A. (2018). Technical and economic viability of co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars in the Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental*, 22(1), 51-56. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p51-56>
- García, J. E., Ruiz, M., Maroniche, G. A., Creus, C., Puente, M., Zawoznik, M. S., & Groppa, M. D. (2023). Inoculation with *azospirillum argentinense* Az19 improves the yield of maize subjected to water deficit at key stages of plant development. *Revista Argentina de Microbiología*, 55(3), 255-261. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2023.01.002>
- García-Olivares, J. G., Mendoza-Herrera, A., & Mayek-Pérez, N. (2012). Efecto de *Azospirillum brasilense* en el rendimiento del maíz en el norte de Tamaulipas, México. *Universidad y Ciencia*, 28(1), 79-84.
- Glick, B. R. (1995). The enhancement of plant growth by free-living bacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 41(2), 109-117. <http://dx.doi.org/10.1139/m95-015>
- González-Huerta, A., Pérez-López, D. D. J., Franco-Mora, O., Balbuena-Melgarejo, A., Gutiérrez-Rodríguez, F., & Romero-Salas, H. (2011). Respuesta de tres cultivares de maíz a la inoculación con *Azospirillum brasilense* bajo cuatro diferentes dosis de nitrógeno. *Ciencia Ergo Sum*, 18(1), 51-58.
- Guardiola-Márquez, C. E., Figueroa-Montes, M. L., Pacheco-Moscoa, A., & Senés-Guerrero, C. (2021). Native microbial consortia improve shoot and root systems at early developmental stages in a seedbed assay. *Scientia fungorum*, 51, e1329. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1329>
- Guerrero-Calero, J. M., Romero-Añazco, Y. V., Salvatierra-Pilozo, D. M., Barbán-Forte, Y., & Cabrera-Verdesoto, C. A. (2025). Análisis de cambios de cobertura vegetal en la hacienda Valle Verde 2017-2022 en el sitio el Jurón, parroquia Puerto Cayo, Ecuador. *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 9(1), 176-184. <https://doi.org/10.47230/unsum-ciencias.v9.n1.2025.176-184>
- Guidinelle, R. B., Burak, D. L., Rangel, O. J. P., Peçanha, A. L., Passos, R. R., da Rocha, L. O., Olivares, F. L., & de Sá Mendonça, E. (2024). Impact of historical soil management on the interaction of plant-growth-promoting bacteria with maize (*Zea mays* L.). *Heliyon*, 10(7), e28754. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28754>
- Guzmán-Trampe, S. (2017). Los microbios y la ecología. *Ciencia: Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 68(2), 50-59.
- Hameeda, B., Harini, G., Rupela, O. P., Wani, S. P., & Reddy, G. (2008). Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna. *Microbiological Research*, 163(2), 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.05.009>
- Hernández-Aguilar, J. A., Bautista-García, H., Merecias-Aparicio, V., Vázquez-Ortiz, F., & Gómez-Arango, L. F. (2022). Uso de mejoradores biológicos en cultivos de razas nativas de maíz en la Mixteca Oaxaqueña. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 9(1), 79-90.
- Higdon, S. M., Pozzo, T., Kong, N., Huang, B. C., Yang, M. L., Jeannotte, R., ... & Weimer, B. C. (2020a). Genomic characterization of a diazotrophic microbiota associated with maize aerial root mucilage. *Plos One*, 15(9), e0239677. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239677>
- Higdon, S. M., Pozzo, T., Tibbett, E. J., Chiu, C., Jeannotte, R., Weimer, B. C., & Bennett, A. B. (2020b). Diazotrophic bacteria from maize exhibit multifaceted plant growth promotion traits in multiple hosts. *Plos One*, 15(9), e0239081. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239081>
- Hungria, M., Campo, R. J., Souza, E. M., & Pedrosa, F. O. (2010). Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*, 331(1-2), 413-425. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0262-0>

- Jesús, S. D., Marco, A., Volke-Haller, V. H., Cortés-Flores, J. I., María-Ramírez, A., & San-Martín-Hernández, C. (2024). Aporte de nitrógeno por el suelo y eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno aplicado en maíz de temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 47(2), 99. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.2.99>
- Kálmán, C. D., Nagy, Z., Berényi, A., Kiss, E., & Posta, K. (2024). Investigating PGPR bacteria for their competence to protect hybrid maize from the factor drought stress. *Cereal Research Communications*, 52(1), 129-150. <https://doi.org/10.1007/s42976-023-00388-0>
- Karpati, E., Kiss, P., Ponyi, T., Fendrik, I., De Zamaroczy, M., & Orosz, L. (1999). Interaction of *Azospirillum lipoferum* with Wheat Germ Agglutinin Stimulates Nitrogen Fixation. *Journal of Bacteriology*, 181(13), 3949-3955. <https://doi.org/10.1128/jb.181.13.3949-3955.1999>
- Khan, N., Bano, A., & Babar, M. A. (2019). The stimulatory effects of plant growth promoting rhizobacteria and plant growth regulators on wheat physiology grown in sandy soil. *Archives of microbiology*, 201(6), 769-785. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01644-w>
- Khatoon, Z., Huang, S., Rafique, M., Fakhra, A., Kamran, M. A., & Santoyo, G. (2020). Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. *Journal of Environmental Management*, 273, 111118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118>
- Khouchi, S., Elhassoufi, W., Loum, M., Ibnyasser, A., Haddine, M., Ghani, R., ... & Bargaz, A. (2022). Phosphate solubilizing bacteria can significantly contribute to enhance P availability from polyphosphates and their use efficiency in wheat. *Microbiological Research*, 262, 127094. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127094>
- Kloepper, J. W., Leong, J., Teintze, M., & Schroth, M. N. (1980). Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature*, 286, 885-886.
- Li, Y., Qu, Z., Xu, W., Chen, W., Hu, Y., & Wang, Z. (2022). Maize (*Zea mays* L.) genotypes induce the changes of rhizosphere microbial communities. *Archives of Microbiology*, 204(6), 321. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02934-6>
- Liu, Y., Nessa, A., Zheng, Q., Hu, D., Zhang, W., & Zhang, M. (2023). Inoculations of phosphate-solubilizing bacteria alter soil microbial community and improve phosphorus bioavailability for moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) growth. *Applied Soil Ecology*, 189, 104911. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104911>
- López-Valenzuela, B. E., Armenta-Bojórquez, A. D., Hernández-Verdugo, S., Apodaca-Sánchez, M. A., Samaniego-Gaxiola, J. A., & Valdez-Ortiz, A. (2019). *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. como promotores del crecimiento en maíz (*Zea mays* L.). *Phyton*, 88(1), 37-46. <https://doi.org/10.32604/phyton.2019.04621>
- Lugtenberg, B. J., Chin-A-Woeng, T. F., & Bloemberg, G. V. (2002). Microbe-plant interactions: Principles and mechanisms. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 81(1-4), 373-383. <https://doi.org/10.1023/a:1020596903142>
- Marques, A. P., Pires, C., Moreira, H., Rangel, A. O., & Castro, P. M. (2010). Assessment of the plant growth promotion abilities of six bacterial isolates using *Zea mays* as an indicator plant. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(8), 1229-1235. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.014>
- Martínez, J. I., Gómez-Garrido, M. D., Gómez-López, M. D., Faz, Á., Martínez-Martínez, S., & Acosta, J. A. (2019). *Pseudomonas fluorescens* affects nutrient dynamics in plant-soil system for melon production. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(2), 223-233.
- Massieu-Trigo, Y., & Lechuga-Montenegro, J. (2002). El maíz en México: biodiversidad y cambios en el consumo. *Análisis Económico*, 17(36), 281-303.
- Medina-Hernández, J., Caamal-Cauich, I., Pat-Fernández, V. G., & Ávila-Dorantes, J. A. (2024). Current challenges and forecasts in maize grain production and consumption in Mexico. *Agro Productividad*, 17(5), 165-172. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i5.2741>
- Moreno-Reséndez, A., García-Mendoza, V., Reyes-Carrillo, J. L., Vásquez-Arroyo, J., & Cano-Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: Una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20(1), 68-83. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>
- Naseem, H., & Bano, A. (2014). Role of plant growth-promoting rhizobacteria and their exopolysaccharide in drought tolerance of maize. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 689-701. <https://doi.org/10.1080/17429145.2014.902125>
- Nosheen, A., Yasmin, H., Naz, R., Bano, A., Keyani, R., & Hussain, I. (2018). *Pseudomonas putida* improved soil enzyme activity and growth of kasumbha under low input of mineral fertilizers. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(4), 520-525. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1461002>
- Okon, Y., & Kapulnik, Y. (1986). Development and function of *Azospirillum*-inoculated roots. *Plant and Soil*, 90(1), 3-16. <https://doi.org/10.1007/bf02277383>
- Okon, Y., & Labandera-González, C. A. (1994). Agronomic applications of *Azospirillum*: an evaluation of 20 years worldwide field inoculation. *Soil Biology and Biochemistry*, 26(12), 1591-1601. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90311-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90311-5)
- Orozco-Mosqueda, M. D. C., Flores, A., Rojas-Sánchez, B., Urtis-Flores, C. A., Morales-Cedeño, L. R., Valencia-Marin, M. F., ... & Santoyo, G. (2021). Plant growth-promoting bacteria as bioinoculants: Attributes and challenges for sustainable crop improvement. *Agronomy*, 11(6), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061167>
- Pang, Z., Mao, X., Zhou, S., Yu, S., Liu, G., Lu, C., ... & Xu, P. (2023). Microbiota-mediated nitrogen fixation and microhabitat homeostasis in aerial root-mucilage. *Microbiome*, 11(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01525-x>
- Pankiewicz, V. C. S., Delaux, P. M., Infante, V., Hirsch, H. H., Rajasekar, S., Zamora, P., ... & Ané, J. M. (2022). Nitrogen fixation and mucilage production on maize aerial roots is controlled by aerial root development and border cell functions. *Frontiers in Plant Science*, 13, 977056. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.977056>
- Pedraza, R. O., Teixeira, K. R., Scavino, A. F., de Salamone, I. G., Baca, B. E., Azcón, R., ... & Bonilla, R. (2010). Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 155-164.
- Peiffer, J. A., & Ley, R. E. (2013a). Exploring the maize rhizosphere microbiome in the field: A glimpse into a highly complex system. *Communicative & Integrative Biology*, 6(5), e25177. <https://doi.org/10.4161/cib.25177>
- Peiffer, J. A., Spor, A., Koren, O., Jin, Z., Tringe, S. G., Dangl, J. L., ... & Ley, R. E. (2013b). Diversity and heritability of the maize rhizosphere microbiome under field conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6548-6553. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302837110>
- Peñas-Corte, M., Bouzas, P. R., Nieto del Río, J., Manzanera, M., Barros-Rodríguez, A., & Fernández-Navarro, J. R. (2024). Enhancing maize stress tolerance and productivity through synergistic application of *Bacillus velezensis* A6 and *Lamiales* plant extract, biostimulants suitable for organic farming. *Biology*, 13(9), 718. <https://doi.org/10.3390/biology13090718>
- Rai, P. K., Sabharwal, U., Singh, S., Yadav, A. N., & Choure, K. (2024). Exploration of drought-tolerant PGPR and their role in regulating antioxidant enzymes in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(11), 4483-4498. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01849-z>
- Rangel-Lucio, J. A., Rodríguez-Mendoza, M., Ferrera-Cerrato, R., Castellanos-Ramos, J. Z., Ramírez-Gama, A. M., & Alvarado-Bárceñas, E. (2011). Afinidad y efecto de *Azospirillum* sp. en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 269-279.
- Reyes, I., Álvarez, L., El-Ayoubi, H., & Valery, A. (2008). Selección y evaluación de rizobacterias promotoras del crecimiento en pimentón y maíz. *Revista Bioagro*, 20(1), 37-48.
- Riggs, P. J., Chelius, M. K., Iniguez, A. L., Kaeppler, S. M., & Triplett, E. W. (2001). Enhanced maize productivity by inoculation with diazotrophic bacteria. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28(9), 829-836. <https://doi.org/10.1071/PP01045>

- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 319-339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- Rodríguez, H., González, T., Goire, I., & Bashan, Y. (2004). Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. *Naturwissenschaften*, 91, 552-555. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0566-0>
- Rodríguez, H., Fraga, R., González, T., & Bashan, Y. (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil*, 287, 15-21. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9056-9>
- Rodríguez, Y. S., Martínez, J. A., & Cruz, A. G. (2021). Los bioestimulantes: Una alternativa para el desarrollo agroecológico cubano. *Ecovida*, 11(3), 225-242.
- Rojas-Sánchez, B., Castelan-Sánchez, H., Garfias-Zamora, E. Y., & Santoyo, G. (2024). Diversity of the maize root endosphere and rhizosphere microbiomes modulated by the inoculation with *Pseudomonas fluorescens* UM270 in a milpa system. *Plants*, 13(7), 1-17. <https://doi.org/10.3390/plants13070954>
- Rojas-Tapias, D., Moreno-Galván, A., Pardo-Díaz, S., Obando, M., Rivera, D., & Bonilla, R. (2012). Effect of inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) on amelioration of saline stress in maize (*Zea mays*). *Applied Soil Ecology*, 61, 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.006>
- Rudolph-Mohr, N., Tötze, C., Kardjilov, N., & Oswald, S. E. (2017). Mapping water, oxygen, and pH dynamics in the rhizosphere of young maize roots. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 180(3), 336-346. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600120>
- Sánchez-Yáñez, J. M., Ayala, I. Y. L., Moreno, J. V., & Arias, N. M. M. (2014). Respuesta del maíz (*Zea mays* L.) a la inoculación con *Azotobacter* sp. y *Burkholderia* sp. a dosis reducida de fertilizante nitrogenado. *Scientia Agropecuaria*, 5, 17-23. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.01.02>
- Sandhya, V. D., Shaik, Z. A., Grover, M., Reddy, G., & Venkateswarlu, B. (2010). Effect of plant growth promoting *Pseudomonas* spp. on compatible solutes, antioxidant status, and plant growth of maize under drought stress. *Plant Growth Regulation*, 62, 21-30. <https://doi.org/10.1007/s10725-010-9479-4>
- Sangoquiza-Caiza, C., Zambrano-Mendoza, J., Borgues-García, M., & Cho, K. J. (2024). Response of flour corn (*Zea mays* L. var. *Amylacea*) to the inoculation of *Azospirillum* and *Pseudomonas*. *La Granja, Revista de Ciencias de la Vida*, 39, 150-159. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.09>
- Shabaan, M., Asghar, H. N., Zahir, Z. A., Zhang, X., Sardar, M. F., & Li, H. (2022). Salt-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria confer salt tolerance to maize through enhanced soil enzymatic activities, nutrient uptake and antioxidant defense. *Frontiers in Microbiology*, 13, 901865. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.901865>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2024). *Panorama agroalimentario 2018-2024*. Consultado el 23 de marzo, 2025, desde <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2025). *Avance de siembras y cosechas*. Ciudad de México, México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Sierra-Macías, M., Andrés-Meza, P., Palafox-Caballero, A., Meneses-Márquez, I., Francisco-Nicolás, N., Zambada-Martínez, A., ... & Tadeo-Robledo, M. (2014). Variación morfológica de maíces nativos (*Zea mays* L.) en el estado de Veracruz, México. *AgroProductividad*, 7(1), 58-65.
- Sweilheh, W. M. (2017). Global research trends on the top eight emerging pathogens according to the World Health Organization. *Global Health*, 13(9), 1-19. <https://doi.org/10.1186/s12992-017-0233-9>
- Tang, M., Liao, H., Wan, Z., Herrera-Viedma, E., & Rosen, M. (2018). Ten years of Sustainability (2009 to 2018): A bibliometric overview. *Sustainability*, 10(5), 1-21. <https://doi.org/10.3390/su10051655>
- Tanya-Morocho, M., & Leiva-Mora, M. (2019). Microorganismos eficientes, propiedades funcionales y aplicaciones agrícolas. *Centro Agrícola*, 46(2), 93-103.
- Tena, G. (2018). Slimy symbiosis. *Nature Plants*, 4, 629. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0257-z>
- Tinoco A., C. A. (2022). *Tecnologías de producción de maíces nativos en la zona sur de Veracruz circunscrita al Istmo de Tehuantepec*. Veracruz, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- USDA (United States Department of Agriculture). (2025). *World Agricultural Supply and Demand Estimates (WASDE) report*. Washington, D.C., USA: United States Department of Agriculture.
- Valencia, L. E. C., Vásquez, G. E. G., Mielles, A. J. C., Morante, F. J. F., & Velásquez, O. I. B. (2024). Evaluación de programas de fertilización sobre el comportamiento agronómico de híbridos de maíz (*Zea mays* L.). *Conocimiento Global*, 9(3), 243-262. <https://doi.org/10.70165/cglobal.v9i3.464>
- Van Berkum, P., & Bohlool, B. (1980). Evaluation of nitrogen fixation by bacteria in association with roots of tropical grasses. *Microbiological Reviews*, 44(3), 491-517. <https://doi.org/10.1128/mr.44.3.491-517.1980>
- Van Deynze, A., Zamora, P., Delaux, P. M., Heitmann, C., Jayaraman, D., Rajasekar, S., ... & Bennett, A. B. (2018). Nitrogen fixation in a landrace of maize is supported by a mucilage-associated diazotrophic microbiota. *PLOS Biology*, 16(8), e2006352. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006352>
- Van-Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Van-Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). *VOSviewer Versión 1.6.20 User's Guide*. Leiden, Países Bajos: Centre for Science and Technology Studies (CWTS), Universidad de Leiden.
- Velasco-Jiménez, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.470>
- Villa-Castro, L., Mayek-Pérez, N., García-Olivares, J. G., & Hernández-Mendoza, J. L. (2014). Efecto de la inoculación en maíz con cepas nativas de *Azospirillum* sp. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 33-38. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83729789004>
- Vyas, P., & Gulati, A. (2009). Organic acid production *in vitro* and plant growth promotion in maize under controlled conditions by phosphate-solubilizing fluorescent *Pseudomonas*. *BMC Microbiology*, 9, 1-15. <https://doi.org/10.1186/1471-2180-9-174>
- Wang, N., Wang, T., Chen, Y., Wang, M., Lu, Q., Wang, K., ... & Zuo, Y. (2024). Microbiome convergence enables siderophore-secreting rhizobacteria to improve iron nutrition and yield of peanut intercropped with maize. *Nature Communications*, 15, 839. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45207-0>
- Yeung, A. W. K., Goto, T. K., & Leung, W. K. (2017). The changing landscape of neuroscience research, 2006-2015: a bibliometric study. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00120>
- Yu, H., Wu, X., Zhang, G., Zhou, F., Harvey, P. R., Wang, L., ... & Zhang, X. (2022). Identification of the phosphorus-solubilizing bacteria strain JP233 and its effects on soil phosphorus leaching loss and crop growth. *Frontiers in Microbiology*, 13, 892533. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.892533>
- Zankar, G. D. C., Abarza, S. D. V., Boccardo, R. J., & Altamirano, F. E. (2017). Efecto de la combinación de microorganismos benéficos en el rendimiento de maíz para grano. *Agrotecnia (Argentina)*, 25, 30. <https://doi.org/10.30972/agr.0252458>
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429-472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>