Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

BACTERIAS NATIVAS COMO PROBIÓTICOS VEGETALES

Clara Ivette Rincón-Molina[1]; Luis Alberto Manzano-Gómez[1,3]; Luis Galdino García-Pérez[2]; Francisco Alexander Rincón-Molina[1]; Reiner Rincón-Rosales[1]; Stephanie Solís Zebadúa[1]; Erick Fabián Sarmiento Megchum[1]; Julio César Maldonado Gómez[1]

[1]Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México, Tuxtla Gutiérrez, 29050, Chiapas, México; [2] Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, 29039, Chiapas, México; [3]3R Biotec SA de CV, Tuxtla Gutiérrez, 29000, Chiapas, México. Autor de correspondencia: clara.rm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

La agricultura mexicana enfrenta el reto de mejorar la productividad sin comprometer la sostenibilidad ambiental. El uso intensivo de fertilizantes químicos ha provocado deterioro del suelo, contaminación hídrica y dependencia de insumos importados. En este contexto, los biofertilizantes representan una alternativa viable, en especial aquellos formulados con bacterias nativas que actúan como probióticos vegetales. Este trabajo revisó los avances científicos y tecnológicos, así como los desafíos regulatorios y prácticos que enfrenta el sector de biofertilizantes en México. Se identificaron esfuerzos históricos desde los años ochenta, así como innovaciones recientes como la aplicación de consorcios microbianos y técnicas de encapsulamiento. Se analizaron programas públicos relevantes y se discutieron riesgos asociados al uso de microorganismos mal caracterizados, particularmente en relación con genes de resistencia a antibióticos. Asimismo, se resaltó la necesidad de una regulación más estricta que garantice la seguridad biológica de los productos disponibles en el mercado. Finalmente, se propuso una ruta de investigación enfocada en el aprovechamiento de cepas bacterianas que aseguren su uso inocuo, la caracterización genómica de las mismas y la articulación entre academia, industria y políticas públicas para fortalecer la soberanía biotecnológica agrícola del país. Las conclusiones destacan la necesidad de reforzar la regulación, invertir en investigación multidisciplinaria y fomentar el uso de tecnologías apropiadas para el desarrollo local de bioinsumos.

Palabras clave: *agricultura sostenible, bacterias nativas, biofertilizantes, probióticos, seguridad biológica*

INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de fertilizantes químicos ha generado preocupación global por su impacto negativo en los ecosistemas, particularmente en la calidad del suelo, el agua y la biodiversidad (Mahanty et al., 2017). En este contexto, el desarrollo de biofertilizantes se posicionó como una alternativa biotecnológica viable para promover la sostenibilidad agrícola, reducir el uso de agroquímicos y conservar los recursos naturales (Gehlot et al., 2021; Vassilev et al., 2015). En México, país con alta diversidad agrícola y microbiana, el interés por estos insumos creció paulatinamente desde la década de 1980, cuando se registraron los primeros ensayos exitosos con

inoculantes rizobiales aplicados en leguminosas (Armenta-Bojórquez, 1986). A pesar del potencial demostrado por los biofertilizantes, su adopción masiva en el país ha sido limitada por factores técnicos, regulatorios y de percepción. El término "biofertilizante" fue en ocasiones utilizado de forma incorrecta para referirse a productos que no contenían microorganismos definidos ni efectos comprobables sobre las plantas (Das, 2019). En contraste, un biofertilizante propiamente dicho fue definido como un producto con composición microbiana conocida, capaz de promover el crecimiento vegetal a través de mecanismos como la fijación biológica de nitrógeno o la solubilización de fósforo (Daniel et al., 2022). El desarrollo de nuevas herramientas moleculares y de secuenciación permitió caracterizar con mayor precisión las cepas microbianas utilizadas, identificar genes funcionales y mejorar la eficiencia y estabilidad de los productos formulados (Adeleke et al., 2022; Kumar et al., 2017). Sin embargo, también se evidenció la necesidad de evaluar aspectos relacionados con la seguridad biológica, como la presencia de genes de resistencia a antibióticos o factores de virulencia en cepas mal seleccionadas (Larsson et al., 2022). Frente a este panorama, resultó necesario analizar el estado actual de los biofertilizantes en México, desde su evolución histórica hasta los retos técnicos, ambientales y normativos que condicionan su implementación. Esta revisión tuvo como propósito ofrecer una visión crítica sobre las oportunidades y limitaciones del uso de bacterias nativas como probióticos vegetales, considerando su impacto sobre la sostenibilidad agrícola y su papel en las políticas públicas del sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión se llevó a cabo mediante el análisis integral de literatura científica especializada, enfocada en el desarrollo, producción y aplicación de bacterias nativas utilizadas como biofertilizantes en la agricultura mexicana. Se consultaron publicaciones indexadas en bases de datos académicas y fuentes oficiales del gobierno mexicano relacionadas con la regulación de insumos biológicos. La localización del estudio correspondió al contexto agrícola de México. Se identificaron prácticas asociadas a la producción artesanal y comercial de biofertilizantes, incluyendo el uso de cepas bacterianas del género Rhizobium, Azospirillum, Bacillus, Pseudomonas y otros microorganismos de interés agronómico. Se analizaron técnicas actuales de formulación, tales como la encapsulación, el uso de portadores sólidos y líquidos, y los procesos de fermentación para la producción a escala industrial. Asimismo, se consideraron elementos del diseño experimental reportados en estudios de campo, incluyendo la aplicación en cultivos como maíz, tomate y leguminosas, así como la evaluación de su eficacia en condiciones de diferentes tipos de suelo y disponibilidad de fósforo. El periodo de análisis comprendió investigaciones realizadas desde la década de 1980 hasta el año 2025. Se incorporaron además criterios regulatorios establecidos por la norma NOM-077-FITO-2000, que establece los requisitos microbiológicos y de efectividad para el registro de productos biofertilizantes en México. Finalmente, se evaluaron metodologías moleculares recientes como la secuenciación genómica, el análisis

proteómico y la identificación de genes funcionales como ureC, nosZ y amoA, utilizados para caracterizar el potencial biotecnológico y la seguridad biológica de las cepas empleadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de biofertilizantes en México presentó una evolución significativa desde su introducción en la década de 1980, cuando se registraron los primeros ensayos exitosos con inoculantes rizobiales en leguminosas (Armenta-Bojórquez, 1986). A partir de estos antecedentes, se impulsó la investigación sobre consorcios microbianos, como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) y hongos micorrízicos arbusculares (AMF), los cuales demostraron efectos positivos sobre la asimilación de fósforo, la fijación de nitrógeno y la producción de fitohormonas (Sahgal et al., 2020; Soumare et al., 2020).

Se observó que la combinación de PGPB con AMF generó efectos sinérgicos que mejoraron la estructura del suelo, incrementaron el contenido de materia orgánica y optimizaron el desarrollo radicular en cultivos como maíz y tomate. Estudios proteómicos revelaron que la coinoculación de estos microorganismos moduló positivamente mecanismos de defensa vegetal y productividad (Concha et al., 2020).

En el ámbito regulatorio, la producción y comercialización de biofertilizantes en México es supervisada por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), bajo la norma NOM-077-FITO-2000. Esta norma establece los criterios microbiológicos mínimos para garantizar la calidad y seguridad de los productos, así como su eficacia agronómica. A pesar de ello, se identifica una saturación del mercado con productos de baja calidad, formulados sin respaldo técnico y con cepas no caracterizadas adecuadamente.

Desde el punto de vista molecular, se documentaron riesgos asociados a la presencia de genes de resistencia a antibióticos (ARGs) y factores de virulencia (VFs) en algunas cepas utilizadas en biofertilizantes comerciales (Larsson et al., 2022). Esta situación resaltó la importancia de implementar estrategias de selección de cepas nativas con bajo riesgo biológico, así como la eliminación de genes no deseados mediante herramientas de edición genética (Wang et al., 2022).

En cuanto a los mecanismos biológicos, se reportó que las bacterias probióticas vegetales promovieron el crecimiento mediante la fijación biológica de nitrógeno (Rhizobium, Azospirillum), la solubilización de fósforo (Pseudomonas, Bacillus), la producción de sideróforos para mejorar la disponibilidad de hierro y la síntesis de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas (Bhattacharyya et al., 2012; Glick et al., 2020). Además,

se demostró que estas bacterias indujeron resistencia sistémica en las plantas, fortaleciendo su capacidad para enfrentar condiciones adversas y ataques patógenos (Gupta et al., 2023).

Se identificaron también múltiples desafíos en la producción y adopción de biofertilizantes, entre ellos: la falta de estandarización en las formulaciones, la baja viabilidad durante el almacenamiento, el limitado acceso a infraestructura para su producción local y la escasa capacitación técnica entre productores. Asimismo, las condiciones agroecológicas variables y la diversidad de suelos dificultaron su efectividad uniforme en campo abierto (Schmidt et al., 2018).

Finalmente, se destacó que la sostenibilidad ambiental derivada del uso de biofertilizantes incluyó la reducción de la volatilización de amoníaco, la disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno y la mejora de la salud del suelo. Particularmente, cepas de Bacillus subtilis y Rhizobium con genes funcionales como ureC y nosZ lograron mitigar emisiones contaminantes, aportando beneficios tanto agronómicos como ecológicos (Rincón-Molina et al., 2025).

CONCLUSIONES

El uso de biofertilizantes formulados con bacterias nativas representa una estrategia viable y sostenible para mejorar la productividad agrícola en México, al tiempo que se reduce la dependencia de insumos químicos. Las bacterias probióticas vegetales favorecen el crecimiento de las plantas mediante mecanismos bien caracterizados como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y la inducción de resistencia sistémica.

La evidencia científica demuestra que la coinoculación de consorcios microbianos, como bacterias promotoras del crecimiento y hongos micorrízicos arbusculares, genera efectos sinérgicos que benefician tanto al cultivo como al suelo. La implementación de tecnologías como la encapsulación, el uso de portadores adecuados y la caracterización genética de las cepas empleadas mejora la eficacia, estabilidad y seguridad de los productos biofertilizantes.

No obstante, persisten retos importantes en términos de regulación, estandarización de calidad, riesgos biológicos potenciales y transferencia de conocimiento al sector agrícola. La adopción generalizada de biofertilizantes requiere fortalecer los marcos normativos, fomentar la investigación interdisciplinaria y garantizar la participación activa de productores, instituciones científicas y organismos gubernamentales.

México posee el potencial científico y biotecnológico para posicionarse como referente en agricultura sostenible mediante el uso seguro y eficaz de biofertilizantes basados en recursos microbianos nativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación. Se reconoce el apoyo financiero brindado por SECIHTI mediante la asignación de becas posdoctorales y doctorales, así como a la empresa 3R Biotec SA de CV por su colaboración técnica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adeleke BS, Fadiji AE, Ayilara MS, Igiehon ON, Nwachukwu BC, Babalola OO. 2022. Strategies to enhance the use of endophytes as bioinoculants in agriculture. Horticulturae 8(6):498. https://doi.org/10.3390/horticulturae8060498

Armenta-Bojórquez, A. D., Ferrera-Cerrato, R., Trinidad, S. A., y Volke, H.V. 1986. Fertilización e Inoculación con Rhizobium y Endomicorrizas (V-A) en Garbanzo Blanco (Cicerarietinum L.) en Suelos del Noroeste de México. Agrociencia. (65):141-160. https://biblat.unam.mx/es/revista/agrociencia/articulo/fertilizacion-e-inoculacion-con-rhizobium-y-endomicorrizas-v-a-en-garbanzo-blanco-cicer-arietinum-l-en-suelos-del-noroeste-de-mexico

Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 28, 1327-1350. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9

Concha, C., & Doerner, P. (2020). The impact of the rhizobia–legume symbiosis on host root system architecture. Journal of experimental botany, 71(13), 3902-3921. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa198

Daniel AI, Fadaka AO, Gokul A, Bakare OO, Aina O, Fisher S, Klein A. 2022. Biofertilizer: the future of food security and food safety. Microorganisms 10(6):1220. https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220

Das HK. 2019. Azotobacters as biofertilizer. Advances in Applied Microbiology 108:1–43. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.07.001

Gehlot, P., Pareek, N., & Vivekanand, V. (2021). Development of biofertilizers and microbial consortium an approach to sustainable agriculture practices. Plant, Soil and Microbes in Tropical Ecosystems, 315-348. 10.1007/978- 981-16-3364-5_15

Glick, B. R., & Glick, B. R. (2020). Introduction to plant growth-promoting bacteria. Beneficial plant-bacterial interactions, 1-37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44368-9_1

Gupta, S., & Pandey, S. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria to mitigate biotic and abiotic stress in plants. Sustainable Agriculture Reviews 60: Microbial Processes in Agriculture, 47-68. 10.1007/978-3-031-24181-9_3

Kumar M, Saxena R, Tomar RS. 2017. Endophytic microorganisms: promising candidate as biofertilizer. In: Singh DP, Singh HB, Prabha R, eds. Microorganisms for Green Revolution, Microbes for Sustainable Crop Production. Vol. 1. Singapore: Springer. p. 77–85. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4_4

Larsson, D. G., & Flach, C. F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. Nature Reviews Microbiology, 20(5), 257-269. https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x

Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. Environmental Science and Pollution Research, 24, 3315-3335. 10.1007/s11356-016- 8104-0

Rincón-Molina CI, Manzano-Gómez LA, García-Pérez LG, Rincón-Molina FA, Rincón-Rosales R. 2025. Advances and challenges in the production and use of native bacteria as plant probiotics in agronomic applications: a Mexican review. Journal of Agriculture and Food Research 21:101917. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101917

Sahgal, S., & Srivastava, D. (2020). Utilization of Microbial Diversity as Biofertilizers. International Journal of Plant and Environment, 6(03), 218-221. https://doi.org/10.18811/ijpen.v6i03.11

Schmidt, J. E., & Gaudin, A. C. (2018). What is the agronomic potential of biofertilizers for maize? A meta-analysis. FEMS microbiology ecology, 94(7), fiy094. 10.1093/femsec/fiy094

Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2020). From isolation of phosphate solubilizing microbes to their formulation and use as biofertilizers: status and needs. Frontiers in bioengineering and biotechnology, 7, 425. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00425

Timofeeva, A. M., Galyamova, M. R., & Sedykh, S. E. (2022). Bacterial siderophores: Classification, biosynthesis, perspectives of use in agriculture. Plants, 11(22), 3065. https://doi.org/10.3390/plants11223065

Vassilev, N., Vassileva, M., Lopez, A., Martos, V., Reyes, A., Maksimovic, I., ... & Malusa, E. (2015). Unexploited potential of some biotechnological techniques for biofertilizer production and formulation. Applied microbiology and biotechnology, 99, 4983-4996. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6656-4

Wang, J., & Chen, X. (2022). Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52(4), 571-630. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835124