



INOCULANTES MICROBIANOS: LOS GRANDES ALIADOS EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

*Nava Galicia Soley B¹., Flores González Ariadne E.¹, Cortés Espinosa Diana V.¹,
Bibbins Martínez Martha D.¹

¹ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Instituto Politécnico Nacional. Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5 Tlaxcala, México

Correo electrónico: *snava@ipn.mx

RESUMEN

Este artículo está centrado en la importancia de los biofertilizantes a base de microorganismos vivos o inoculantes microbianos en la agricultura, las ventajas en comparación con los fertilizantes de origen químico, para evitar el deterioro ambiental a través de la práctica agrícola sostenible. De igual manera se resalta la importancia de comprender la participación de los inoculantes en la nutrición y crecimiento vegetal mediante la fijación de nutrientes, producción de hormonas y biocontrol de patógenos. Finalmente se analiza el panorama de los inoculantes microbianos comerciales, mismos que a lo largo del tiempo han enfrentado una serie de obstáculos, y que, dadas las tendencias internacionales, en torno a la existencia de normativas, buscan impulsar prácticas agrícolas sostenibles, por lo que el mercado de este tipo de productos muestra una tendencia mucho más favorable.

Las perspectivas futuras en este importante campo de investigación están encaminadas a lograr un equilibrio entre la sinergia de los microorganismos con el cultivo para generar una agricultura sostenible.

Palabras clave: *Agricultura sostenible, Fertilizantes, Inoculantes microbianos*

ABSTRACT

The present article focuses on the importance of biofertilizers based on live microorganisms and microbial inoculants to agriculture and the advantages of the use of these products over the use of chemical fertilizers, promoting the application of sustainable agriculture to prevent environmental degradation. Moreover, it emphasizes the need to understand their role in plant nutrition and growth through nutrient fixation, hormone production, and pathogen biocontrol. Finally, the article describes the panorama of commercial microbial inoculants, which, over time, have encountered a series of obstacles. However, given the international trends around regulations seeking to drive the uptake of sustainable agricultural practices, the market for these products is now much more favorable. In the future, this crucial field of research aims to achieve a balance in the synergy between microorganisms and crops to foster sustainable agriculture.

Keywords: *Fertilizers, Microbial inoculants, Sustainable agriculture*

INTRODUCCIÓN

Ante el creciente aumento de la población y la consiguiente demanda de alimentos, se buscan alternativas sostenibles, como el uso de biofertilizantes en la agricultura. Uno de los principales requisitos para garantizar una adecuada nutrición de los cultivos son los nutrientes del suelo, vitales para el crecimiento y rendimiento de estos. Los principales elementos químicos reconocidos como esenciales para las plantas son diecisiete e incluyen fuentes de carbono (C^{-4}/C^{+4}), nitrógeno (N^{-3}), oxígeno (O^{-}), hidrógeno (H^{+}) y minerales como potasio (K^{+}), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), fósforo (P^{3-}), azufre (S^{2-}), manganeso (Mn^{2+}/Mn^{4+}), zinc (Zn^{2+}), cobre (Cu^{2+}/Cu^{+}), molibdeno (Mo^{2+}), níquel (Ni^{2+}), cloro (Cl), boro (B^{3-}/B^{3+}) y hierro (Fe^{2+}). En ausencia de estos nutrientes, las plantas no pueden completar su ciclo de vida ni llevar a cabo funciones fisiológicas normales (Figura 1) (Osman 2013). La agricultura actual depende completamente de los fertilizantes de origen químico y/o natural para proporcionar estos elementos esenciales y de esta forma aumentar el rendimiento de los cultivos (Peoples et al. 2014, IFA 2020). Los fertilizantes químicos se utilizan para proporcionar nutrientes necesarios para las plantas en tiempos cortos y obtener re-

sultados rápidos, al ser aplicados producen una alta concentración de nutrientes, pero conllevan efectos adversos al ambiente, entre ellos la contaminación del agua causada por la lixiviación y evaporación, lo que produce toxicidad e infertilidad del suelo (Rashmi et al. 2020).

Por otra parte, los fertilizantes de origen natural tienen un menor impacto ambiental en suelo, agua y aire. Pueden mejorar la estructura del suelo y su fertilidad. Dentro de esta categoría, los inóculos microbianos pueden promover el crecimiento de las plantas porque actúan en la descomposición de la materia orgánica, que incrementan la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, favoreciendo el desarrollo vegetal por la producción de hormonas de crecimiento, así como, mejorar el entorno agroecológico (Lalitha 2017). A pesar de estos beneficios, su empleo es limitado sobre todo en países en desarrollo donde la falta de inversión por el sector industrial, la complejidad para producir, así como los elevados costos para el registro de productos y la poca legislación para su aprobación, han limitado la disponibilidad de biofertilizantes en el mercado (Joshi et al. 2022).

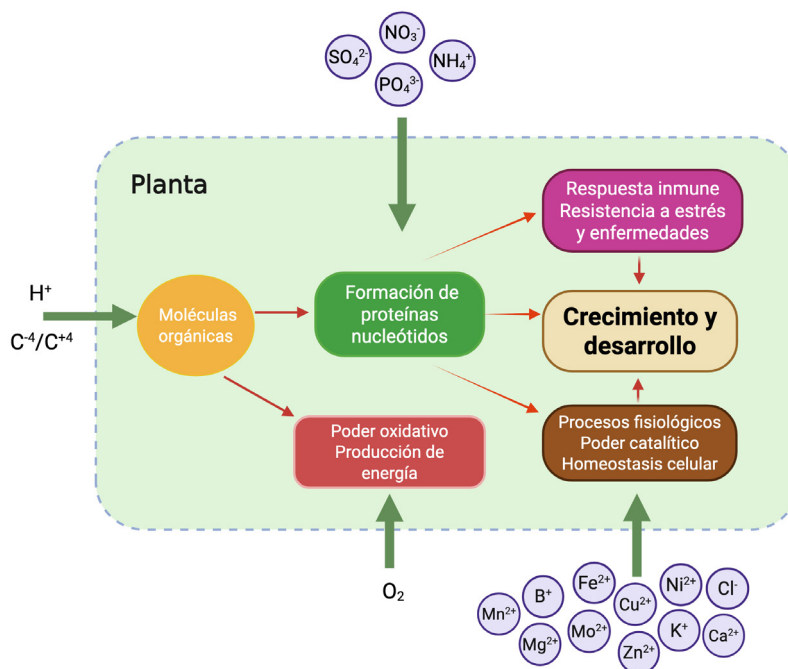


Figura 1. Nutrientes esenciales para mejorar y mantener la salud de las plantas

2

LOS BENEFICIOS DE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL APLICADOS EN LA AGRICULTURA

Los biofertilizantes son formulaciones que incorporan microorganismos vivos, como bacterias, hongos y algas, los cuales favorecen el crecimiento de las plantas mediante distintos mecanismos (Zhao 2024). Estos microorganismos generalmente se denominan microbios promotores de crecimiento vegetal (MPCV), bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) o rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), los cuales ayudan a la absorción de nutrientes mediante

sus asociaciones en la zona rizosférica cuando se suministran a las plantas ya sea a través de semillas o del suelo (Vessey 2003), lo que contribuye en el aumento de rendimiento de los cultivos y la fertilidad de los suelos mejorando el ciclo de nutrientes, promoviendo la salud del suelo, la síntesis de sustancias que las plantas pueden asimilar directamente, la inducción de resistencia de la planta al estrés y la prevención de enfermedades (García-Fraile 2015; Mączik 2020).

2.1 ¿Y cómo hacen los microorganismos para mejorar el aporte de los nutrientes a las plantas?

La forma en que las plantas aprovechan los nutrientes depende de su estructura. Por ejemplo, no pueden absorber directamente el nitrógeno del aire. Sin embargo, ciertos microorganismos fijadores de nitrógeno utilizan la enzima nitrogenasa para convertirlo en amoníaco (NH_4^+) o nitratos (NO_3^-), haciéndolo accesible para su absorción.

La mayoría del fósforo presente en el suelo, tanto en su forma orgánica como inorgánica, no se puede absorber por las plantas (Zhao 2024). Los microorganismos que solubilizan el fósforo, como bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*, así como hongos, *Trichoderma spp.*, liberan enzimas como fitasas, nucleasas, fosfatasas y diversos ácidos orgánicos. Estas sustancias permiten la hidrólisis y solubilización del fósforo orgánico, transformándolo en fosfato, la forma en la cual las plantas pueden absorberlo (Zhao 2024). La mayor proporción de potasio en el suelo se encuentra unido a minerales como feldespato potásico, moscovita, illita y vermiculita, lo que impide su disponibilidad para las plantas. Los microorganismos solubilizadores de potasio producen compuestos como ácidos orgánicos (ácido cítrico, tartárico, oxálico principalmente) que liberan iones de potasio de los minerales, así mismo; producen exopolímeros en forma de biopelícula donde las células producen polisacáridos extracelulares (conglomerado de proteínas, lípidos y ADN) creando microambientes óptimos para una solubilización efectiva. Este mecanismo también ayuda a disminuir el pH y facilitar la quelación (unión a ion metálico) para acelerar la solubilización y disponibilidad de potasio para la planta (Figura 2) (Xue et al. 2018; Muthuraja y Muthukuma 2021; Olaniyan et al. 2022).

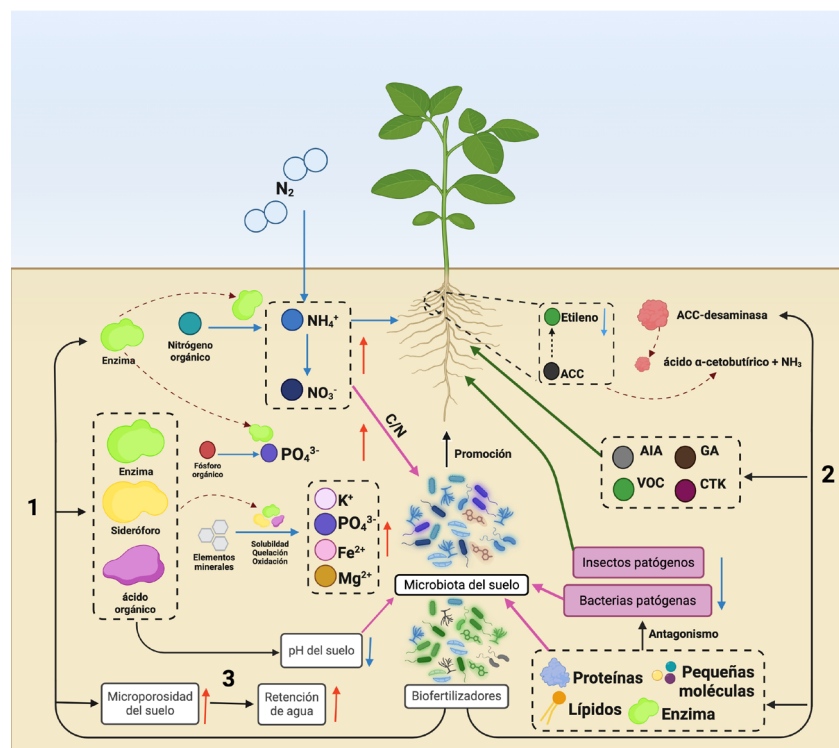


2.2 Los microorganismos, los grandes aliados en el desarrollo de las plantas

Los microorganismos tienen la capacidad de regular el crecimiento, desarrollo y la respuesta al medio ambiente de las plantas, debido a que aumentan la disponibilidad de macro y micronutrientes, además de sintetizar y/o modular la biosíntesis de fitohormonas como ácido indol acético (AIA), giberelina (GA), citoquinina (CK), 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC)-desaminasa y etileno. Por ejemplo; el etileno es una hormona vegetal clave que regula diversos procesos fisiológicos, como el crecimiento de la raíz y pelos radiculares, maduración de frutos, senescencia de hojas, formación de estomas y la respuesta a factores de estrés (Iqbal 2017). Su nivel, influenciado por las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, impacta el desarrollo del sistema radicular. Bajos niveles de su precursor (ACC) estimulan la formación de raíces laterales, mientras que concentraciones más altas pueden inhibir el crecimiento de la raíz principal. Por lo tanto, el etileno puede inhibir o estimular el crecimiento vegetal, dependiendo de la especie y la con-

centración hormonal (Vandenbussche 2012). Por otra parte; también producen metabolitos volátiles (VOC), que pueden inducir resistencia a enfermedades y tolerancia al estrés abiótico, mitigando el estrés al incrementar los exopolisacáridos, osmorreguladores, como la glicina betaína (GB) y antioxidantes (catalasa-CAT), la superóxido dismutasa (SOD), el ascorbato (Asc) y el glutatión (GSH), reduciendo las especies reactivas de oxígeno (ROS) y el estrés oxidativo (Tsukanova et al. 2017; Khan, 2019). De igual forma, las bacterias de la rizosfera que producen sideróforos pueden incrementar la disponibilidad de hierro en las plantas y fortalecer su tolerancia a altas concentraciones de metales pesados (Zhao 2024). Finalmente, los biofertilizantes pueden producir antibióticos, como en el caso particular de varias cepas de *Bacillus* destacan en el control de hongos fitopatógenos gracias a la producción de pioluteorina, pirronitrina, ácido fenacin-1-carboxílico y 2,4-diacetilfloroglucinol. (Kefi et al. 2015; Mahanty et al. 2017).

Figura 2. Mecanismo de promoción del crecimiento vegetal por biofertilizantes. (1) Mejorar el estado nutricional de las plantas, liberando elementos minerales por disolución, quelación y oxidación (2) Regula el crecimiento vegetal, por medio del incremento o decremento de hormonas vegetales, secretar COV's, entre otros (3) Finalmente; mejorar las condiciones ambientales del suelo, al cambiar su microporosidad y facilitar la retención de agua. (modificado de Zhao, 2024)



3

DESARROLLO Y COMERCIALIZACIÓN DE LOS BIOFERTILIZANTES

La aplicación de biofertilizantes en la agricultura es realizada desde principios del siglo pasado, siendo “Nitragin” (*Rhizobium* sp) el primer producto patentado (USP Patent No. 570,813, noviembre de 1896) (Arora et al. 2017). Actualmente, la demanda de biofertilizantes microbianos va en aumento en todo el mundo. El número de empresas emergentes que desarrollan y comercializan productos microbianos ha aumentado

significativamente, AgBiome, BioInnovations, Indigo, Maronne y New Leaf Symbiotics son algunos ejemplos (Batista 2021). Siendo India, China, EE. UU. y Alemania los líderes actuales en la investigación de inóculos microbianos a nivel mundial. El impulso de este tipo de biotecnología se debe principalmente a un mayor grado de conciencia ambiental, así como al desarrollo de una legislación más estricta para el campo. Por ejemplo, el nuevo Pacto Verde de la Unión Europea tiene como objetivo reducir el uso de fertilizantes nitrogenados en al menos un 20% y el uso de pesticidas químicos en un 50% para 2030 (Batista 2021), la reducción de estos insumos químicos tendría amplios beneficios ambientales y de sostenibilidad. En tanto que China ha legislado los planes de acción para el uso de fertilizantes, así como pesticidas, aplicados desde 2020 (Shuqin y Fang 2018), donde se impulsa a una agricultura sostenible, mejorando la eficiencia de los insumos y garantizando la salud pública. En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de empresas desarrolladoras de biofertilizantes cuyos productos ya son comercializados a nivel mundial (Sammauria et al. 2020).



Tabla 1. Biofertilizantes comercializados por empresas internacionales

Producto®	Empresa	Cepa Bacteriana	País de origen
Nodulator®	BASF SE	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Alemania
Varios	DuPont de Nemours and Company	Consorcio PGPR	EEUU
Cell-Tech® Nitragin Gold® TagTeam®	Novozymes	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>Rhizobia</i> + <i>Penicillium bilaii</i>	Dinamarca
Accomplish®	Verdesian Life Sciences LLC	PGPR + enzymes + organic acids + chelators	EEUU
EVL coating®	EVL Inc.	Consorcio PGPR	Canada

4

PANORAMA ACTUAL DE LOS BIOFERTILIZANTES EN MÉXICO

A pesar de la baja rentabilidad de la actividad agrícola y, por ende, urgente necesidad de innovaciones tecnológicas, la producción activa de biofertilizantes en México sigue siendo limitada y se realiza principalmente en pequeñas empresas, instituciones de educación e investigación y por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) apoyado por el gobierno federal o municipal (Grageda et al. 2012). Las empresas; Biofábrica Siglo XXI, Biofertilizantes Mexicanos S.A de C.V, GreenCorp Biorganiks de México S.A. DE C.V. han introducido al mercado nacional una serie de productos registrados. Sin embargo, al igual que en la tendencia mundial, en nuestro país se muestra un crecimiento en investigación y desarrollo de estos productos, con un enfoque en la agricultura sostenible como medio para reducir la contaminación, proteger la biodiversidad y fomentar la seguridad alimentaria, lo que sin duda puede contribuir al desarrollo económico y la preservación de los recursos naturales del país (Tabla 2).

Producto®	Empresa	Cepa Bacteriana	Cultivo
AZO FER®	Biofábrica Siglo XXI	<i>Azospirillum brasilense</i>	IMPI 00-006
AZOTON AA PLUS®	Biofertilizantes Mexicanos S.A de C.V,	<i>Azospirillum</i> spp y <i>Azotobacter</i> spp	hortalizas, frutales y ornamentales
INOCREP ®	BUAP	<i>Pseudomonas putida</i> KT2440	maíz
Bio Control Fol®	AgriBest	bacterias antagonistas y productoras de antibióticos	varios
BactoCROP®	Bioqualitum	<i>Bacillus</i> y <i>Azospirillum</i>	maíz, frijol, cebada, avena, trigo o sorgo
Nutripellet®	Bioqualitum	<i>Bacillus</i> spp, <i>Nitrobacter</i> sp, <i>Pseudomonas fluorescens</i>	hortalizas, granos
AZOS® Blue Powder	RTI AG	<i>Azospirillum brasilense</i>	Cereales y hortalizas

Tabla 2. Biofertilizantes elaborados en México

5

RETOS A FUTURO DE LOS BIOFERTILIZANTES

Dentro de los retos a considerar en el establecimiento y éxito de los biofertilizantes en México, podemos mencionar los siguientes: 1. Desarrollo e implementación de tecnologías innovadoras que puedan competir con la industria de los fertilizantes químicos. Esto incluye la mejora de formulaciones que aumenten la resistencia de los microorganismos a factores adversos como el calor, la desecación y la competencia con microorganismos nativos (Yadav 2024). Por ejemplo; el empleo de consorcios con varios microorganismos puede combinar diferentes capacidades microbianas en un producto con efectos diversos de promoción y rendimiento. De igual forma comprender los diversos mecanismos que rigen la supervivencia y persistencia de los biofertilizantes en diferentes ambientes edáficos es fundamental para mejorar su estabilidad a largo plazo. Recientemente, la manipulación genética es otra forma de mejorar la estabilidad de los biofertilizantes (Yadav 2024), sin embargo,

la producción, importación y liberación al medio ambiente que se basan en microorganismos genéticamente modificados tienen restricciones en diferentes países y México no es la excepción. Finalmente, se debe invertir en la creación de tecnologías de aplicación más efectivas y económicas, así como en la mejora de los procesos de producción a gran escala para reducir los costos (Palacios 2023).

2. Cambio de la percepción de los agricultores, basado en la información y en la conciencia de protección al ambiente, para llevar a cabo esto se requieren programas de capacitación, demostraciones prácticas en campo y estudios de caso que muestren el impacto positivo de su uso. Para ello, el apoyo gubernamental es primordial ya sea como incentivos o subsidios, que motiven a los agricultores a adoptar estas tecnologías y a cambiar sus prácticas agrícolas hacia modelos más responsables y productivos (Palacios 2023, Sembrando México 2024).

6

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El desarrollo y aplicación de biofertilizantes en México tiene un gran potencial para enfrentar la creciente demanda de productos agrícolas y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, es necesario abordar los desafíos existentes y trabajar hacia la promoción, distribución y adopción de estas tecnologías.



REFERENCIAS

- Arora, N. K., Verma, M., & Mishra, J. (2017). Rhizobial bioformulations: past, present and future. *Rhizotrophs: Plant growth promotion to bioremediation*, 69-99.
- Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA), (2020) <https://www.fertilizer.org/>
- Batista, B. D., & Singh, B. K. (2021). Realities and hopes in the application of microbial tools in agriculture. *Microbial Biotechnology*, 14(4), 1258-1268.
- García-Fraile, Paula. Menéndez Esther and Rivas Raúl. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. Review. *AIMS Bioengineering*, Volume 2, Issue 3, 183-205. DOI: 10.3934/bioeng.2015.3.183
- Grageda-Cabrera, Oscar Arath, Díaz-Franco, Arturo, Peña-Cabral, Juan José, & Vera-Núñez, José Antonio. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1261-1274.
- Iqbal, N., Khan, N. A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., & Khan, M. I. R. (2017). Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. *Frontiers in plant science*, 8, 475.
- Joshi, S. K., & Gauraha, A. K. (2022). Global biofertilizer market: Emerging trends and opportunities. *Trends of applied microbiology for sustainable economy*, 689-697.
- Khan, N., Bano, A., Rahman, M. A., Guo, J., Kang, Z., & Babar, M. A. (2019). Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. *Scientific reports*, 9(1), 2097.
- Kefi, A., Slimene, I. B., Karkouch, I., Rihouey, C., Azaiz, S., Bejaoui, M., ... & Limam, F. (2015). Characterization of endophytic *Bacillus* strains from tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) displaying antifungal activity against *Botrytis cinerea* Pers. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31, 1967-1976
- Lalitha, S. (2017). Plant growth-promoting microbes: a boon for sustainable agriculture. *Sustainable agriculture towards food security*, 125-158.
- Lopes, M. J. D. S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606454.
- Maçik, M., Gryta, A., & Frąc, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in agronomy*, 162, 31-87.
- 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.
- Muthuraja, R., & Muthukumar, T. (2021). Isolation and characterization of potassium solubilizing *Aspergillus* species isolated from saxum habitats and their effect on maize growth in different soil types. *Geomicrobiol J*, 38(8), 672-685.
- Olaniyan, F. T., Alori, E. T., Adekiya, A. O., Ayorinde, B. B., Daramola, F. Y., Osemwegie, O. O., & Babalola, O. O. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Annals of Microbiology*, 72(1), 45.
- Osman, K.T. (2013). Plant Nutrients and Soil Fertility Management. In: *Soils*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_10
- Palacios-López, L. A. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 1(2), 52-64.
- Peoples M.B., Richardson A.E., Simpson R.J., Fillery I.R.P., (2014). Soil: Nutrient Cycling, Editor(s): Neal K. Van Alfen, Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, Academic Press, Pages 197-210, ISBN 9780080931395, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00094-2>
- Rashmi, I., Roy, T., Kartika, K. S., Pal, R., Coumar, V., Kala, S., & Shinoji, K. C. (2020). Organic and inorganic fertilizer contaminants in agriculture: Impact on soil and water resources. *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*, 3-41.
- Rees, D. C., Akif Tezcan, F., Haynes, C. A., Walton, M. Y., Andrade, S., Einsle, O., & Howard, J. B. (2005). Structural basis of biological nitrogen fixation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1829), 971-984.
- Sammauria, R., Kumawat, S., Kumawat, P., Singh, J., & Jatwa, T. K. (2020). Microbial inoculants: potential tool for sustainability of agricultural production systems. *Archives of microbiology*, 202(4), 677-693.
- Sembrando México (2024) <https://sembrandomexico.com.mx/biofertilizantes-agricultura-mexicana/>
- Shuqin, J., & Fang, Z. (2018). Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges. *Journal of resources and ecology*, 9(1), 50-58.
- Tsukanova, K. A., Meyer, J. J. M., & Bibikova, T. N. (2017). Effect of plant growth-promoting *Rhizobacteria* on plant hormone homeostasis. *South African journal of botany*, 113, 91-102.
- Vandenbussche, F., & Van Der Straeten, D. (2012). The role of ethylene in plant growth and development. *Annual Plant Reviews Volume 44: The Plant Hormone Ethylene*, 44, 219-241.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- Xue, X., Zhang, L., Peng, Y., Li, P., & Yu, J. (2019). Effects of mineral structure and microenvironment on K release from potassium aluminosilicate minerals by *Cenococcum geophilum* fr. *Geomicrobiology Journal*, 36(1), 11-18.
- Yadav, A., & Yadav, K. (2024). Challenges and opportunities in biofertilizer commercialization. *SVOA Microbiol*, 5(1), 1-14.
- Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., ... & Jia, B. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980-2022). *Geography and Sustainability*, 5(1), 19-28.