



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL

**EVALUACIÓN AGROFISIOLÓGICA DE MAÍZ NATIVO
INOCULADO CON MICROORGANISMOS
SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO**

TESIS

Que presenta:

Alfredo Guevara López

Como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical

Director de tesis:

Dr. Carlos Juan Alvarado López

Conkal, Yucatán, México

26 marzo de 2026



TecNM

Conkal, Yucatán, México a 26 de marzo de 2026.

El comité de tesis del candidato a grado: Alfredo Guevara López, constituido por los CC. Dr. Carlos Juan Alvarado López, Dr. Jairo Cristóbal Alejo, Dr. José María Tun Suárez y M.C. Joaquín Sergio López Vázquez, habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **EVALUACIÓN AGROFISIOLÓGICA DE MAÍZ NATIVO INOCULADO CON MICROORGANISMOS SOLUBILIZADORES DE FÓSFORO**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

ATENTAMENTE


Dr. Carlos Juan Alvarado López
Director de Tesis
M.C. Joaquín Sergio López Vázquez
Co-director de Tesis
Dr. Jairo Cristóbal Alejo
Asesor de Tesis
Dr. José María Tun Suárez
Asesor de Tesis



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

Instituto Tecnológico de Conkal
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Conkal, Yucatán, México a 26 de marzo de 2026

DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

ATENTAMENTE

Alfredo Guevara López

RESUMEN

México es el principal consumidor de maíz (*Zea mays* L.) a nivel mundial, esta gramínea ocupa la mayor superficie agrícola del país, donde predominan variedades nativas cultivadas en sistemas de bajo insumo y de temporal. Estas accesiones constituyen un acervo fitogenético valioso para la adaptación y persistencia local; sin embargo, presentan limitaciones en su desarrollo fenológico cuando se establecen en suelos con deficiencia de fósforo (P). Esta restricción afecta la síntesis de metabolitos, el desarrollo morfológico y la producción de biomasa, lo que impacta negativamente su rendimiento potencial.

La inoculación edáfica con microorganismos benéficos representa una alternativa para incrementar la disponibilidad de P y estimular la actividad fisiológica del cultivo. Los microorganismos solubilizadores de fósforo (MSF) incluyen hongos micorrízicos arbusculares y bacterias rizosféricas capaces de favorecer la captación de agua y minerales a través de la expansión del sistema radical y la transformación del fósforo insoluble en formas disponibles. En este contexto, la presente investigación aborda los efectos de la inoculación microbiana sobre maíz nativo en condiciones de campo, a través de la descripción de los procesos bioquímicos que impactan en las características fisiológicas y agronómicas. Los resultados respaldan el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal, particularmente aquellos solubilizadores de fósforo, como una estrategia viable en condiciones tropicales para fortalecer la producción y contribuir a la soberanía alimentaria de las comunidades frente al avance de semillas comerciales.

Palabras clave: *Zea mays*, inoculantes microbianos, rendimiento

ABSTRACT

Mexico is the world's leading consumer of corn (*Zea mays* L.). This gramineous occupies the largest agricultural area in the country, where native varieties grown in low-input and rainfed systems predominate. These accessions constitute a valuable plant genetic resource for local adaptation and persistence; however, they have limitations in their phenological development when established in phosphorus (P) deficient soils. This restriction affects metabolite synthesis, morphological development, and biomass production, which negatively impacts their potential yield.

Soil inoculation with beneficial microorganisms is an alternative way to increase P availability and stimulate crop physiological activity. Phosphorus solubilizing and mobilizing microorganisms (PSM) include arbuscular mycorrhizal fungi and rhizospheric bacteria capable of promoting water and mineral uptake by expanding the root system and transforming insoluble phosphorus into available forms. In this context, the present research addresses the effects of microbial inoculation on native corn under field conditions, through the description of the biochemical processes that impact physiological and agronomic characteristics. The results support the use of plant growth-promoting microorganisms, particularly phosphorus solubilizers, as a viable strategy in tropical conditions to strengthen production and contribute to the food sovereignty of communities in the face of the advance of commercial seeds.

Keywords: *Zea mays*, microbial inoculants, yield

CAPÍTULO I. MAÍZ NATIVO: CONTEXTO, LIMITACIONES Y OPORTUNIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

México es el octavo productor mundial y el principal consumidor de maíz (*Zea mays*) (FIRA *et al.*, 2024). Este cultivo se domesticó en Mesoamérica hace aproximadamente 9 000 años a partir de su ancestro silvestre, el teocintle (*Zea mays sp. parviglumis*) (Matsuoka *et al.*, 2002; CONABIO, 2022). En nuestro país se albergan 59 razas nativas con amplia variación morfológica, fisiológica y genética asociada a gradientes ambientales (Xolocotzi, 1949; CONABIO, 2011). Actualmente, la producción de maíz nativo presenta una tendencia de crecimiento moderado hacia ciclos agrícolas futuros, especialmente en sistemas de temporal, lo que evidencia la necesidad de reforzar sus capacidades productivas como componente estratégico en el fitomejoramiento y en la promoción de la seguridad alimentaria mediante la aplicación de prácticas sostenibles (Tanumihardjo *et al.*, 2020; Prasanna *et al.*, 2021). Estos cultivares constituyen un recurso fitogenético estratégico en la producción nacional, ya que es posible obtener cosechas incluso con un aporte mineral reducido (Guzzon *et al.*, 2021). Esta propiedad se atribuye a la plasticidad y diversidad fenotípica del germoplasma, lo que favorece la expresión de rasgos como la resistencia a plagas y enfermedades, así como la capacidad de respuesta frente a condiciones de estrés (Fenzi *et al.*, 2022; Ozair *et al.*, 2025).

Sin embargo, a pesar de su elevada capacidad de adaptación y persistencia local, el maíz nativo presenta rendimientos inferiores en comparación con materiales mejorados (Ureta *et al.*, 2020), particularmente en sistemas de bajo insumo y en suelos con deficiencias nutrimentales (Tadeo-Robledo *et al.*, 2018; Bellon *et al.*, 2018).

Entre los factores que limitan la productividad del maíz, destaca la disponibilidad de fósforo, un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal por su función en la transferencia de energía y la síntesis de biocompuestos (Salisbury & Ross, 1992). Su disponibilidad en el suelo es limitada a causa de su alta reactividad química para formar moléculas complejas o insolubles, especialmente en regiones tropicales y kársticas (Hinsinger, 2001). Esta condición influye en la eficiencia fotosintética, el desarrollo radicular y el rendimiento final en el cultivo de maíz (Xia *et al.*, 2021).

En consecuencia, el uso de fertilizantes minerales fosfatados se ha mantenido a pesar de que su costo y eficiencia son variables (Syers *et al.*, 2008). Además, la aplicación intensiva estos minerales alteran la estructura, la diversidad microbiana del suelo y modifican los procesos edáficos de largo plazo (Dincă *et al.*, 2022).

Ante este panorama, se han desarrollado estrategias biotecnológicas como la inoculación con microorganismos funcionales, principalmente bacterias rizosféricas (PGPR) y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) (Pandey & Saharan, 2025). Las bacterias tienen la capacidad de liberar ácidos orgánicos, producir enzimas y generar compuestos quelantes que transforman fracciones de fósforo no disponible en formas asimilables por la planta (Taurian, 2017; Li *et al.*, 2024). Por su parte, los HMA amplían la zona de absorción radical mediante el desarrollo de hifas extraradicales, lo que facilita el flujo de fósforo hacia la planta y mejora la eficiencia nutrimental (Santana *et al.*, 2023; Lu *et al.*, 2023). Bajo este enfoque, es posible comprender el papel del fósforo en el suelo y el de los microorganismos en el cultivo de variedades nativas y con ello promover su uso, conservación y manejo (Rowe *et al.*, 2015).

1.2 ANTECEDENTES

1.2.1 El fósforo en los agroecosistemas

El fósforo es un mineral que forma parte de un ciclo complejo en los agroecosistemas, en él interactúan procesos geológicos, químicos y biológicos que determinan su disponibilidad para las plantas (Vance *et al.*, 2003; Lizcano-Toledo *et al.*, 2021). A diferencia de otros macronutrientes la dinámica de este elemento se caracteriza por una movilidad limitada debido a su alta capacidad de retención en matrices edáficas, por lo que es necesario plantear enfoques que mejoren su disponibilidad y aprovechamiento por las plantas (Roberts & Johnston, 2015). Se estima que cerca del 98% del fósforo total presente en suelos agrícolas se encuentra en formas no disponibles para las plantas (Sharma *et al.*, 2013). En suelos alcalinos, como los predominantes en regiones tropicales y kársticas alrededor del 90% de los fertilizantes fosfatados se precipitan como fosfato tricálcico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) (Achal *et al.*, 2007; Banerjee *et al.*, 2010).

Este elemento químico desempeña un papel central en el metabolismo vegetal al formar parte de moléculas clave como ATP, ADP, NADPH, fosfolípidos de membrana y ácidos nucleicos (Khan *et al.*, 2023). Además, condiciona procesos como la división celular, la síntesis de fitohormonas, la elongación y ramificación radicular, la fotosíntesis y el transporte de asimilados, lo que influye directamente en el crecimiento y el rendimiento del cultivo (Plaxton & Tran, 2011). En este contexto, la eficiencia en la adquisición y uso del fósforo constituye un rasgo crítico para la productividad del maíz, especialmente en sistemas de bajo insumos y con variedades locales (Lara *et al.*, 2010).

1.2.2 Intercambio de iones y transporte hacia la planta.

La absorción de nutrientes por las raíces de maíz sigue una secuencia funcional en la que primero los iones se acercan a la superficie radicular mediante procesos como la difusión, el flujo de masas y la intercepción radicular, los cuales generan gradientes de concentración desde el suelo hacia la raíz (Liu *et al.*, 2000; Mai *et al.*, 2019). Posteriormente, el ingreso de estos iones a los tejidos requiere superar barreras anatómicas y fisiológicas de la raíz incluyendo la epidermis, los pelos radicales y el parénquima cortical, lo que facilita el movimiento de nutrientes hacia el cilindro vascular hasta la banda de Caspary, la cual bloquea el movimiento apoplástico y faculta el ingreso de solutos al simplasto, asegurando un transporte activo y selectivo de elementos regulados por la planta (Peterson *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 2024). Una vez dentro de la raíz, el fósforo y otros minerales se transportan a través del xilema hacia tejidos fotosintéticos y de crecimiento, mientras que el floema redistribuye los productos del metabolismo fotosintético hacia las raíces y órganos reproductivos. Por lo que la disponibilidad de iones en las raíces modifica su arquitectura, incrementa la densidad de pelos radicales y promueve la liberación de compuestos y biomoléculas (Lynch, 2011; Vance, 2001).

Este flujo ocurre mediante un simporte que moviliza iones ortofosfato (H_2PO_4^-) siguiendo gradientes electroquímicos regulados por la expresión de transportadores de fósforo de la familia PHT1 (Lu *et al.*, 2023). En cultivos de maíz se ha identificado la familia ZmPHT1 (ZmPHT1;1 a ZmPHT1;13) los cuales codifican proteínas de alta afinidad responsables de la absorción de fosfato desde la rizosfera y cuya expresión se incrementa en condiciones de baja disponibilidad de fósforo durante la simbiosis micorrízica, lo que contribuye a la eficiencia nutrimental del cultivo, optimiza el crecimiento y la productividad (Roveda & Polo, 2017; Lu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2025).

1.2.3 Microbiota rizosférica y su papel en la biofertilización

La rizosfera es un nicho dinámico donde las raíces liberan exudados, los cuales están compuestos por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, mucílago, iones y compuestos que sostienen la actividad metabólica de microbios especializados y modulan las interacciones microorganismo-suelo-planta (Bonkowski *et al.*, 2021; Upadhyay *et al.*, 2024). Simultáneamente, estas relaciones reconfiguran la química del suelo mediante reacciones bioquímicas que modifican el pH, la disponibilidad de iones y en consecuencia promueven la regulación de genes asociados a la síntesis de metabolitos secundarios, (Korenblum *et al.*, 2022).

Diversos ensayos agronómicos muestran que la inoculación conjunta o independiente de bacterias benéficas y hongos micorrízicos arbusculares constituye una estrategia biotecnológica para mejorar la eficiencia en el uso de fertilizantes químicos (Adesemoye & Kloepper, 2009; Pan *et al.*, 2023). Estos aislados microbianos ya sean de entornos locales o de adquisición comercial se asocian con un mayor contenido de P foliar, aumento del área radical, de la biomasa aérea, y un desempeño fotosintético superior con esquemas de fertilización reducida en maíz nativo (De la Vega-Camarillo *et al.*, 2023; Beltrán-Medina *et al.*, 2023).

1.2.3.1 Bacterias solubilizadoras de fósforo

Las bacterias con capacidad de biodegradar moléculas recalcitrantes de base fosfatada constituyen un grupo funcional, donde convierten fracciones de P no reactivas en formas asimilables por las plantas. (Richardson & Simpson, 2011). Esto ocurre a través de procesos complementarios: las bacterias secretan ácidos orgánicos e inorgánicos, protones, enzimas y compuestos quelantes y a su vez las raíces producen exopolisacáridos que alimentan la microbiología rizosférica (Pan *et al.*, 2023; Rawat, 2021). Por lo que estas bacterias responden a señales radiculares mediante tropismos y quimiotaxis, así como a eventos edáficos como la adaptación a deficiencias minerales, o la síntesis de exudados radiculares (Aroney *et al.*, 2021).

Bacillus subtilis

Diversas especies de *Bacillus subtilis* han sido reportadas por su capacidad para solubilizar fosfatos minerales en cultivos de maíz, mediante la producción de ácidos orgánicos como gluconato, lactato y citrato (Chen *et al.*, 2006). Además, estas bacterias rizosféricas sintetizan fitohormonas como ácido indolacético (AIA) y compuestos orgánicos volátiles que favorecen el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Idris *et al.*, 2007). Su capacidad para formar endosporas le permite persistir en ambientes variables y colonizar la rizosfera de manera eficiente.

Pseudomonas fluorescens

Actualmente se estudia a *Pseudomonas fluorescens* por su habilidad para producir sideróforos, fosfatasas y exopolisacáridos que facilitan la movilización de P en la rizósfera (Rodríguez & Fraga, 1999). También participa en la modulación de las señales

moleculares entre la raíz y la microbiota, influyendo en la expresión de genes asociados con el transporte de nutrientes y la arquitectura radicular (Loper *et al.*, 2012). Su capacidad para sintetizar compuestos antifúngicos la convierte en un microorganismo benéfico doble: biofertilizante y biocontrolador.

1.2.3.2 Hongos micorrízicos arbusculares

Los HMA establecen asociaciones obligadas con la mayoría de las plantas cultivadas, extienden una red de hifas extrarradicales que exploran mayores volúmenes de suelo captan P, lo transportan directamente a las raíces mediante la formación de arbuscúlos dentro de las células corticales (Figura. 1), que funcionan como la principal interfaz de intercambio nutrimental y lo disponen a la planta (Smith & Read, 2008). Estas estructuras ramificadas maximizan la superficie de contacto y permiten el transporte eficiente de fosfato hacia la planta, compensado por la transferencia de carbohidratos y lípidos desde la raíz hacia el hongo (Ahmed *et al.*, 2023). Además, los HMA facilitan el reclutamiento de bacterias rizosféricas cooperantes, estableciendo sinergias que incrementan la eficiencia de movilización de P (Lu *et al.*, 2023).

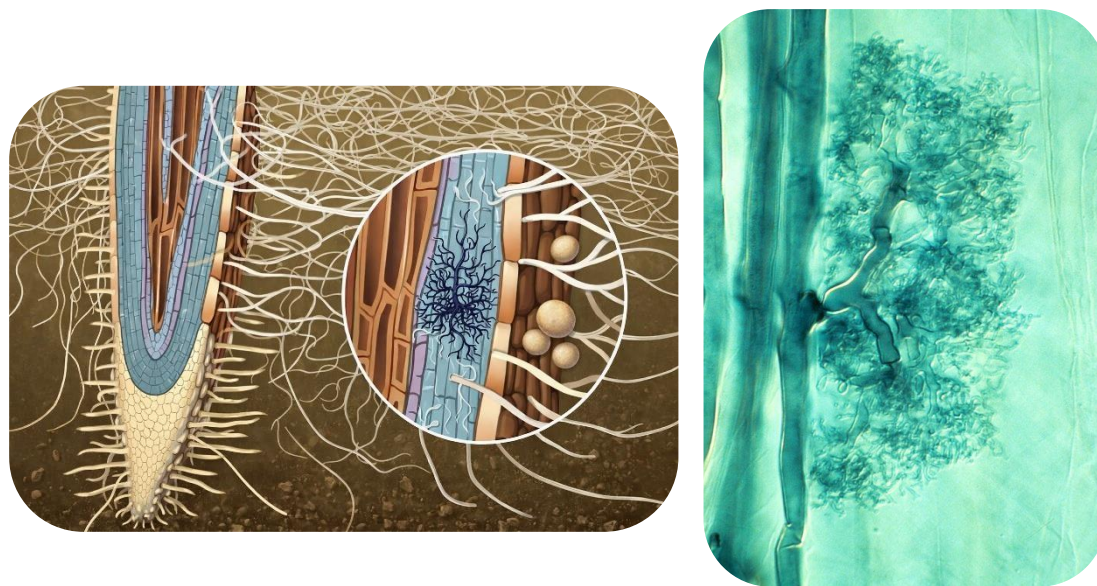


Figura 1. Inserción de la estructura arbuscular en la raíz de la planta.

Rhizophagus intraradices

El hongo micorrízico arbuscular *Rhizophagus intraradices* establece una simbiosis mutualista con el maíz que incrementa la absorción de P a través de su sistema de hifas extrarradicales (Smith & Smith, 2011). Durante esta interacción, el hongo transfiere P a la planta a través de los arbuscúlos, mientras recibe carbohidratos derivados de la fotosíntesis. La colonización micorrízica también induce cambios en la expresión génica

relacionados con transporte de P, señales hormonales y resistencia al estrés (Gutjahr & Paszkowski, 2013).

1.3 HIPÓTESIS

La inoculación microbiana en un cultivo de maíz nativo con productos comerciales a base de *Rhizophagus intraradices*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens* influye en la expresión de características agronómicas y fisiológicas en condiciones de campo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de la inoculación con microorganismos solubilizadores de fósforo en las características agrofisiológicas de un cultivar maíz nativo de la raza Nal-tel y su impacto en los componentes del rendimiento en condiciones de campo.

1.4.2 Objetivos específicos

1.- Determinar el efecto de la inoculación con en variables fisiológicas relacionadas con la fotosíntesis y el intercambio de gases.

2.- Analizar la respuesta de la inoculación microbiana sobre parámetros agronómicos asociados a la producción de biomasa y rendimiento.

1.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

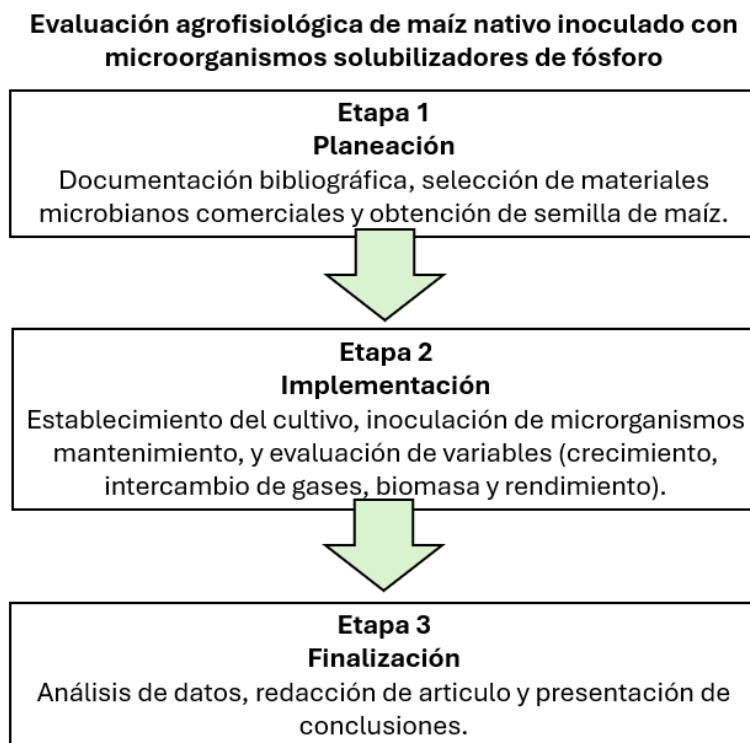


Figura. 2 Diagrama de flujo de la estrategia experimental propuesta proyecto de tesis.

LITERATURA CITADA

- Achal, V., Savant, V. V., & Reddy, M. S. (2007). Phosphate solubilization by a wild type strain and UV-induced mutants of *Aspergillus tubingensis*. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 695–699. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.09.003>
- Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2196-0>
- Ahmed, L., Wang, X., Han, Y., et al. (2023). Carbon and lipid transfer in arbuscular mycorrhizal symbiosis: Implications for plant nutrition. *Trends in Plant Science*, 28(4), 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.11.006>
- Aroney, S. T. N., Poole, P. S., & Sánchez-Cañizares, C. (2021). Rhizobial chemotaxis and motility systems in action in the soil. *Frontiers in Plant Science*, 12, 725338. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.725338>
- Banerjee, S., Palit, R., Sengupta, C., & Standing, D. (2010). Stress induced phosphate solubilization by *Arthrobacter* sp. and *Bacillus* sp. isolated from tomato rhizosphere. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6), 378–383.
- Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., & Sarukhán, J. (2018). Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican campesinos. *Proceedings of the Royal Society B*, 285(1885), 20181049. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1049>
- Beltrán-Medina, E. A., De la Vega-Camarillo, M., et al. (2023). Biofertilization strategies improve phosphorus use efficiency and productivity of native maize. *Agronomy*, 13(9), 2341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092341>
- Campolino, M. L., Paula Lana, U. G. de, Gomes de Sousa, E. A., Coelho, A. M., & Morais de Sousa, S. (2022). Phosphate fertilization affects rhizosphere microbiome of maize and sorghum genotypes. *Brazilian Journal of Microbiology*.
- Chen, Y. P., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W. A., & Young, C. C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34(1), 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2011). *Proyecto Global de Maíces Nativos*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/proyectoMaices>

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2022, 12 de diciembre). *Maíces*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices>
- De la Vega-Camarillo, M., Beltrán-Medina, E. A., et al. (2023). Native maize response to microbial inoculation under low phosphorus availability. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(5), 789–803.
- Enstone, D. E., Peterson, C. A., & Ma, F. (2002). Root endodermis and exodermis: Structure, function, and responses to the environment. *Journal of Plant Growth Regulation*, 21(4), 335–351. <https://doi.org/10.1007/s00344-003-0002-2>
- Fenzi, M., Rogé, P., Cruz Estrada, A., Tuxill, J., & Jarvis, D. (2022). Community seed network in an era of climate change: dynamics of maize diversity in Yucatán, Mexico. *Agriculture and Human Values*, 39(1), 339–356. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10249-3>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA); SIAP & SADER. (2024). *Panorama Agroalimentario 2024: Maíz*. Gobierno de México.
- Gao, Y. Q., Su, Y., & Chao, D. Y. (2024). Exploring the function of root diffusion barriers. *Nature Plants*, 10, 1865–1874. <https://doi.org/10.1038/s41477-024-01842-5>
- Guzzon, F., Arandia Rios, L. W., et al. (2021). Conservación y aprovechamiento de la diversidad del maíz latinoamericano. *Agronomy*, 11(1), 172. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010172>
- Idris, E. E., Iglesias, D. J., Talon, M., & Borriss, R. (2007). Tryptophan-dependent IAA affects plant growth promotion. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 20(6), 619–626. <https://doi.org/10.1094/MPMI-20-6-0619>
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus regulates plant stress responses. *Plants*, 12(15), 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Korenblum, E., Dong, Y., Szymanski, J., et al. (2022). Rhizosphere microbiome mediates plant–soil feedbacks. *Nature Communications*, 13, 590. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28100-1>
- Lu, Y., Qin, Q., Yang, L., Liu, X., & Xu, H. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance phosphate uptake. *Journal of Experimental Botany*, 74(12), 3593–3608. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad093>
- Lynch, J. P. (2011). Root phenes for enhanced soil exploration. *Plant Physiology*, 156(3), 1041–1049. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175414>
- Mai, T. H., Schnepf, A., Vereecken, H., et al. (2019). Multiscale root uptake model. *Plant and Soil*, 439, 273–292. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3890-4>

- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, G. J., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize. *PNAS*, 99(9), 6080–6084. <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>
- Ozair, F., Adak, A., Murray, S. C., et al. (2025). Phenotypic plasticity in maize grain yield. *Plant Genome*, 18(3), e70078. <https://doi.org/10.1002/tpg2.70078>
- Pan, X., Chen, M., et al. (2023). Phosphate-solubilizing bacteria improve phosphorus availability. *Applied Soil Ecology*, 182, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104720>
- Péret, B., Desnos, T., Jost, R., Kanno, S., Berkowitz, O., & Nussaume, L. (2014). Root architecture responses. *Plant Physiology*, 166(4), 1713–1723. <https://doi.org/10.1104/pp.114.244541>
- Prasanna, B. M., Cairns, J. E., Zaidi, P. H., et al. (2021). Breeding for climate resilience in maize. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1729–1752. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03773-7>
- Rawat, J. (2021). Phosphate solubilization mechanisms. *Journal of Applied Microbiology*, 131(2), 799–810. <https://doi.org/10.1111/jam.14992>
- Roberts, T. L., & Johnston, A. E. (2015). Phosphorus use efficiency. *Resources, Conservation and Recycling*, 105(B), 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.013>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria. *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)
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Tanumihardjo, S. A., McCulley, L., Roh, R., et al. (2020). Maize agro food systems. *Global Food Security*, 25, 100327. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100327>
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., et al. (2020). Maize yield in Mexico. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>
- Upadhayay, V. K., et al. (2024). Avances microbianos en la agricultura. En *Inoculantes microbianos*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0633-4_5
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- White, P. J., & Hammond, J. P. (2008). Phosphorus nutrition of terrestrial plants. *New Phytologist*, 178(3), 427–446. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02330.x>
- Xolocotzi, E. H. (1949). Maize granaries in Mexico. *Botanical Museum Leaflets, Harvard University*, 13(7), 153–192.
- Zhang, J., Wang, Y., Chai, T., & Zhang, R. (2019). Phosphate-solubilizing bacteria enhance growth. *Applied Soil Ecology*, 138, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.012>

CAPITULO II. EVALUACIÓN DE INOCULANTES MICROBIANOS EN EL INTERCAMBIO DE GASES, BIOMASA Y COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CRIOLLO EN SUELO LEPTOSOL DE YUCATÁN

Artículo publicado

Alfredo Guevara-López¹, Carlos Juan Alvarado-López², Joaquín Sergio López-Vázquez¹, Jairo Cristóbal-Alejo¹, José María Tun-Suárez¹, René Garruña Hernández², Arnoldo Enrique Alfaro-Corres¹, Esaú Ruiz-Sánchez¹

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico S/N, Municipio de Conkal, C.P. 97345. Conkal, Yucatán, México.

² SECIHTI-Tecnológico Nacional de México, IxM/Instituto Tecnológico de Conkal, Avenida Tecnológico S/N, Municipio de Conkal, C.P. 97345. Conkal, Yucatán, México.

2.1 RESUMEN

En México, alrededor del 75 % de las plantas de maíz son variedades criollas; de manera particular, en Yucatán el maíz es cultivado en suelos Leptosol, los cuales presentan baja capacidad de almacenamiento de agua y problemas en la nutrición vegetal. Los inoculantes microbianos representan una alternativa a estas condiciones al mejorar el enraizamiento de las plantas y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de inoculantes microbianos a base de *Rhizopagus irregularis*, *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis* sobre los parámetros de crecimiento y rendimiento del maíz criollo Nal-tel. Los inoculantes microbianos se aplicaron en maíz criollo Nal-tel y se determinaron los parámetros de intercambio de gases en la etapa de floración, así como los parámetros de rendimiento en la etapa de madurez fisiológica. Los inoculantes microbianos causaron un aumento significativo en los parámetros de intercambio de gases y biomasa seca (27–110 y 10–63 %, respectivamente). Las plantas inoculadas no presentaron efecto significativo en los parámetros de rendimiento (1637.50–1987.50 kg ha⁻¹).

Palabras clave: Bioinoculantes, promoción del crecimiento, hongo micorrízico, intercambio de gases.

ABSTRACT

In Mexico, around 75 % of corn plants are native varieties; particularly in Yucatán, corn is grown in Leptosol soils, which have low water storage capacity and nutritional limitations. Microbial inoculants represent an alternative to these conditions by improving plant rooting and nutrient availability in the soil. The objective of this work was to evaluate the effect of microbial inoculants based on *Rhizophagus irregularis*, *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* on the growth and yield parameters of native corn Nal-tel. Microbial inoculants were applied to native corn Nal-tel, and gas exchange parameters were determined at the flowering stage, while yield parameters were evaluated at the physiological maturity stage. Microbial inoculants showed a significant increase in gas exchange parameters and dry biomass (27–110 and 10–63 %, respectively). Inoculated plants did not show a significant effect on yield parameters (1637.50–1987.50 kg ha⁻¹).

Keywords: Bioinoculants, plant growth promotion, mycorrhizal fungus, gas exchange.