

Respuestas morfológicas a la biofertilización y aplicación de enmiendas húmicas en plantas de mezquite

Morphological responses to biofertilization and vermicompost leachates application in mesquite seedlings

Joselyne Carranza-Treviño¹ , Eduardo Alanís-Rodríguez¹ , José Ángel Sigala-Rodríguez^{3*} ,
Víctor Manuel Molina-Guerra² , Javier Jiménez-Pérez¹ , María Inés Yáñez-Díaz¹ 

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Linares-Cd. Victoria Km 145. Apartado Postal 41, CP. 67700 Linares, Nuevo León, México.

²RENAC, S.A. de C.V. Departamento de Investigación y Gestión. Perlitas 127, Col. Las Glorias, CP. 67710. Linares, Nuevo León, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle del Guadiana. Km 4.5 Carretera Durango-El Mezquitil, CP. 34170. Durango, México.

*Autor de correspondencia: sigala.jose@inifap.gob.mx

Artículo científico

Recibido: 19 de marzo 2024

Aceptado: 28 de mayo 2025

RESUMEN. La aplicación de humus y bacterias promotoras de crecimiento son métodos de biofertilización cada vez más usados en cultivos agrícolas con la finalidad de disminuir el uso de fertilizantes inorgánicos o sintéticos. Sin embargo, su implementación en el cultivo de especies arbóreas en vivero, así como sus implicaciones en la producción de plantas con fines de reforestación ha sido escasamente estudiado. En el presente estudio se evaluó fertilización con humus líquido de lombriz y la inoculación con *Azospirillum brasilense* en plantas de mezquite (*Prosopis laevigata* H. & B. ex Willd.) en la etapa de vivero. Se estableció un experimento factorial con tres dosis de enmienda húmica: 1) 0 (control), 2) 60 y 3) 120 mL L⁻¹; y dos niveles del inoculante: 1) sin aplicación y 2) con aplicación. Se monitoreó la evolución de la altura y diámetro de las plantas durante el crecimiento vegetativo y su distribución de biomasa al finalizar el cultivo. Los resultados mostraron un efecto positivo de la fertilización con humus de lombriz, en el crecimiento de plantas de mezquite en vivero, pero solo con la dosis baja. Por otra parte, contrario a lo esperado, la inoculación con la bacteria *A. brasilense* no mejoró el crecimiento de las plantas de mezquite. Incluso, en combinación con una dosis alta de humus, la inoculación inhibió el crecimiento de las plantas. Con estos resultados, se confirma que es posible diseñar esquemas de biofertilización para producir plantas forestales en vivero, pero se resaltan las limitantes que deben considerarse en su implementación.

Palabras clave: *Azospirillum brasilense*, crecimiento vegetativo, *Prosopis laevigata*, vermicompost.

ABSTRACT. The application of vermicompost and plant growth-promoting bacteria are increasingly used biofertilization methods to reduce the use of synthetic fertilizers. However, their implementation in tree nursery species cultivation and their implications for producing tree seedlings for reforestation have been scarcely studied. In this study, fertilization with vermicompost leachates and inoculation with *Azospirillum brasilense* were assessed in mesquite seedlings (*Prosopis laevigata*) under nursery conditions. A factorial experiment was conducted with three vermicompost doses: 1) 0 (control), 2) 60 y 3) 120 mL L⁻¹ and two inoculation levels: 1) with inoculation and 2) without inoculation. Plant height and diameter were monitored during the vegetative growth, and the biomass yield at the end of cultivation. Results showed a positive effect of fertilization with vermicompost on plant growth, but only at low doses. On the other hand, contrary to expectations, the inoculation with *A. brasilense* did not enhance the plant growth. Indeed, combined with high vermicompost fertilization, the inoculation inhibited plant growth. With these results, we confirm that it is possible to design biofertilization schemes to grow nursery tree seedlings, but the results also highlight the limitations that need to be considered for biofertilization implementation in practice.

Key words: *Azospirillum brasilense*, *Prosopis laevigata*, vegetative growth, vermicompost.

INTRODUCCIÓN

Prosopis laevigata (mezquite) es una leguminosa arbórea de relevancia ecológica y sociocultural en los ecosistemas áridos y semiáridos de México. Además de su uso maderable y dendroenergético (Carrillo-Parra *et al.* 2011), el mezquite se ha aprovechado para diversos propósitos; por ejemplo, como planta medicinal, forraje y para alimentación humana (Díaz-Batalla *et al.* 2018, García-Monjaras *et al.* 2021). A nivel ecológico, el mezquite tiene importancia en la provisión de servicios ecosistémicos, como captura de carbono (Patiño-Flores *et al.* 2019), control de erosión del suelo (Vásquez-Méndez *et al.* 2010) y formación de islas de recursos y biodiversidad (Monroy-Ata *et al.* 2007). Por lo tanto, es una especie idónea para restaurar y conservar suelos degradados de ecosistemas semiáridos (Rodríguez-Sauceda *et al.* 2014) e, incluso, se ha utilizado en la remediación de suelos debido a su potencial bioacumulador de metales pesados (Muro-González *et al.* 2020).

El aprovechamiento para la industria del carbón vegetal y otros productos maderables, así como los cambios de uso de suelo, han ocasionado la reducción y fragmentación de las poblaciones naturales de mezquite (Molina-Guerra *et al.* 2019). Al mismo tiempo, los esfuerzos de reforestación de estos ecosistemas no han sido exitosos (Mata-Balderas *et al.* 2022). Una de las causas más frecuentes del fracaso de los programas de reforestación es el uso de plantas de vivero con baja calidad morfológica y fisiológica (Prieto-Ruiz *et al.* 2016). Por lo tanto, los protocolos actuales de propagación y cultivo en vivero aun requieren ajustes para producir plantas con características morfo-fisiológicas ideales y que además promuevan un uso eficiente de recursos (Basave-Villalobos *et al.* 2024).

En los viveros forestales, frecuentemente se emplean esquemas de producción en los que se aplican fertilizantes inorgánicos de forma indiscriminada, sin considerar los requerimientos nutricionales de la especie de interés (Asif *et al.* 2018). De esta manera, el uso poco eficiente de los fertilizantes en los viveros genera lixiviados químicos en exceso que, eventualmente, se convierten en fuentes de contaminación del suelo y cuerpos de agua (Juntunen *et al.* 2002). Por lo tanto, existe la necesidad de implementar esquemas de fertilización eficientes, incluyendo productos que minimicen el impacto ambiental, sin demeritar el crecimiento de las plantas.

Los fertilizantes orgánicos o biofertilizantes pueden usarse en sustitución parcial o como suplemento de los sintéticos en diversos cultivos (Tang *et al.* 2022). Sin embargo, su aplicación en la producción de especies arbóreas en vivero ha sido escasamente abordada. Uno de los fertilizantes orgánicos más populares es el humus de lombriz o vermicompost, al cual le atribuyen varios beneficios, como fuente de nutrición de entrega lenta para las plantas, mejora la actividad microbiana y otras características físicas del suelo o sustrato (Gutiérrez-Miceli *et al.* 2017, Moridi *et al.* 2021, Koskey *et al.* 2023). En algunas especies arbóreas, estudios previos han encontrado efectos positivos de la aplicación del humus de lombriz sobre el crecimiento de las plantas (Shourije *et al.* 2014, Xue *et al.* 2022); aunque, poco se conoce sobre las dosis óptimas que deben aplicarse en mezquite.

Otra alternativa de fertilización orgánica es el uso de rizobacterias promotoras del crecimiento, las cuales están vinculadas con la producción de fitohormonas (Castro *et al.* 2007) y otros mecanismos como la absorción de agua y nutrientes o la fijación de nitrógeno (Fibach-Paldi *et al.* 2012, Cassán

et al. 2020). Algunos estudios señalan que las plantas que son inoculadas con estas bacterias tienen mayor probabilidad de establecerse en el sitio de plantación (Aguirre-Medina *et al.* 2014) e, incluso, acelerar la recuperación de indicadores de salud del suelo (Bashan *et al.* 2012). Estudios en especies del género *Prosopis*, inoculación con rizobacterias, como *Rizhobium* o *Azospirillum*, muestran efectos positivos en el crecimiento aéreo y radical (Villegas-Espinoza *et al.* 2010, Quiñones-Gutiérrez *et al.* 2013, González *et al.* 2018) y variables fisiológicas relacionadas con el estado hídrico de las plantas (Domínguez-Núñez *et al.* 2012), por lo que esta práctica podría incorporarse en los protocolos de cultivo de mezquite en vivero. A pesar de que existen investigaciones que evalúan el efecto de rizobacterias promotoras de crecimiento, o de fertilizantes orgánicos, pocos estudios han abordado la combinación de ambos en plantas de *P. laevigata*. En este sentido, el objetivo fue evaluar efecto de la inoculación con *A. brasilense*, en combinación con diferentes dosis la fertilización de humus de lombriz, sobre el crecimiento de plantas *P. laevigata* en la etapa de vivero. Se partió de la hipótesis de que la inoculación con *A. brasilense* y la fertilización de humus de lombriz potenciaría el crecimiento de plantas *P. laevigata* en la etapa de vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el vivero forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, ubicado el municipio de Linares, Nuevo León (Noreste de México; 24° 47.4' LN, 99° 32.3' LO; a 380 msnm). Las semillas utilizadas en el experimento fueron recolectadas en áreas del ejido "El Diez" (24° 51.97' LN, 99° 27.38' LO; con 298 msnm), ubicado en el municipio de Linares, Nuevo León, durante el mes de junio del 2022. Éstas se obtuvieron de vainas maduras de individuos adultos de *P. laevigata* con características dominantes en cuanto a crecimiento, vigor y sanidad. Antes de la siembra, se aplicó un tratamiento pregerminativo a las semillas, que consistió en romper físicamente la testa utilizando un molino manual para nixtamal.

La siembra se realizó el día 26 de septiembre del 2022 en bolsas de polietileno negro de 10 x 23 cm (650 cm³ de volumen), con sustrato compuesto por tierra negra de monte. Dentro de cada bolsa fueron colocadas dos semillas. Las bolsas se distribuyeron en seis platabandas del vivero (200 en cada una), cubiertas por malla sombra con una transmisividad del 50%. Durante el periodo de emergencia se les aplicó riego dos veces por semana (lunes y viernes). Una vez completada la emergencia de las plántulas, se hizo una depuración de la emergencia; dejando sólo una plántula por bolsa en aquellas que germinaron ambas semillas, o haciendo una reposición en donde no se presentó la germinación.

Tratamientos de fertilización y diseño experimental

Se estableció un experimento factorial 3x2 resultante de combinar la fertilización con humus de lombriz en tres niveles: 1) 0 (control), 2) 60 y 3) 120 mL L⁻¹; y dos niveles de aplicación de biofertilizante con inóculo de *Azospirillum brasilense* (Azofer® Plus, BioFábrica Siglo XXI SA de CV, México): 1) sin aplicación y 2) con aplicación. La enmienda húmica se aplicó con el riego cada 15 días a partir de la octava semana después de siembra, previo a la reanudación del crecimiento de primavera. Por otra parte, la inoculación con *A. brasilense* se hizo en un solo evento al inicio de la fertilización, en la octava semana. El inóculo se preparó en una concentración de 1.9 g L⁻¹ y se

aplicaron 100 mL de la solución por maceta. La combinación de ambos factores dio un total de seis tratamientos, los cuales se subdividieron en cuatro repeticiones con 50 plántulas cada una y organizadas bajo un diseño completamente al azar.

Evaluación de variables morfológicas

Al inicio de la fertilización, 24 plantas por tratamiento (seis por repetición) fueron seleccionadas para monitorear el crecimiento en altura y diámetro hasta el final del periodo de cultivo cumpliendo nueve meses de edad (270 días después de siembra). Las plantas se midieron cada 21 días, desde el 26 de febrero hasta el 30 de junio del 2023. Las alturas se midieron con un flexómetro (Truper® Expert, Truper, México) y los diámetros, al ras del sustrato, se evaluaron mediante el uso de un calibrador digital (Mitutoyo® Digimatic CD-4" AX, Kawasaki, Japón). Al finalizar el cultivo (30 de junio del 2023), se seleccionaron 12 plantas por tratamiento (tres por repetición) para evaluar la biomasa de las plantas. La determinación de biomasa se realizó después de haber lavado cuidadosamente la raíz, separando cada planta en parte aérea y raíz, con secado a 65 °C por 72 horas en una estufa de aire forzado (FE-133. Felisa, México). Después de secadas, las plantas se separaron en hojas, tallo y raíz y se determinó el peso en gramos de cada tejido con una balanza analítica (Ohaus® Adventurer, Ohaus, México).

Análisis estadístico

El efecto de la aplicación de humus y la inoculación con *A. brasilense*, sobre las variables de altura y diámetro, durante el período de cultivo, se evaluó a través de un ANOVA de medidas repetidas. Este análisis se realizó mediante el ajuste de un modelo de efectos mixtos con el paquete 'lme4' del software R (Bates *et al.* 2015) en el que se incluyó el tiempo (días después de siembra, DDS) y los factores de estudio como efectos fijos y la planta como efecto aleatorio. Por otra parte, las variables de biomasa (hojas, tallo y raíz) se analizaron mediante un ANOVA de dos vías. Para cada variable se comprobaron los supuestos de normalidad con la prueba de Shapiro Wilk y homogeneidad de varianzas, con la prueba Levene, usando los paquetes 'car' (Fox y Weisberg 2011) y 'stats' (R Core Team 2022), respectivamente. Los datos de las variables altura y biomasa del tallo no presentaron una distribución normal, lo cual se ajustó mediante la transformación a logaritmo natural. Cuando el efecto fue significativo, se realizó una comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) con el paquete 'emmeans' de R (Lenth *et al.* 2019).

RESULTADOS

Se encontró un efecto significativo de la dosis de humus en el crecimiento en altura y diámetro de las plantas; aunque, las diferencias fueron evidentes hasta los 189 días después de siembra (interacción significativa DDS×humus, $p < 0.001$). En general, las plantas fertilizadas con dosis media de humus (60 mL L⁻¹) mostraron mejor crecimiento en altura (Figura 1A), seguidas de aquellas con dosis alta (120 mL L⁻¹) y, en menor medida, las que no fueron fertilizadas (0 mL L⁻¹). Por otra parte, en la variable diámetro, la adición de humus en ambas dosis mejoró significativamente el crecimiento desde los 160 días después de siembra (Figura 1B).

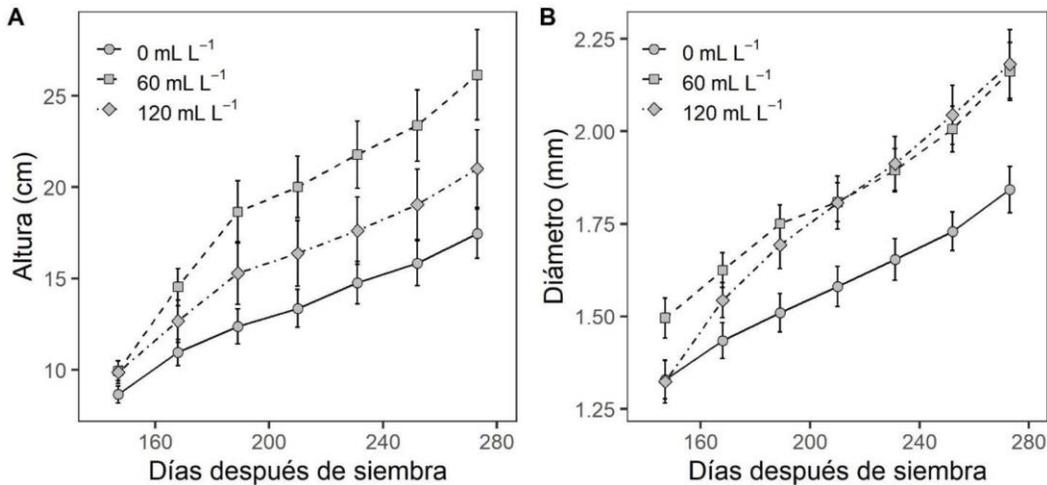


Figura 1. Crecimiento en altura (A) y diámetro (B) en plantas de mezquite (*Prosopis laevigata*) sometidas a diferentes dosis de aplicación de enmiendas húmicas. Los puntos representan valores promedio e intervalos de confianza al 95% (n = 48). Las diferencias entre tratamientos pueden inferirse si los intervalos de confianza no se superponen.

Por otra parte, se encontró menor crecimiento, tanto en altura y diámetro, en plantas que se inocularon con *A. brasilense* durante los cuatro meses evaluados. En altura, las diferencias entre las plantas inoculadas y no inoculadas ocurrieron a partir del día 168 después de siembra (interacción significativa DDS×inoculante, $p < 0.001$; Figura 2A). Por el contrario, las diferencias en diámetro fueron significativas en todo el periodo de evaluación ($p < 0.001$, Figura 2B).

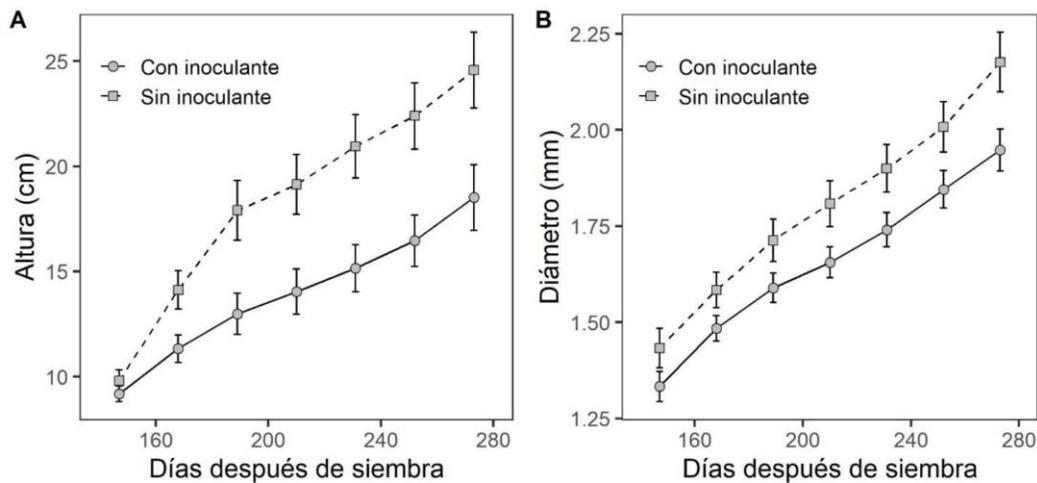


Figura 2. Crecimiento en altura (A) y diámetro (B) en plantas de mezquite (*Prosopis laevigata*) inoculadas con *Azospirillum brasilense* en comparación con plantas no inoculadas. Los puntos representan valores promedio e intervalos de confianza al 95% (n = 36). Las diferencias entre tratamientos pueden inferirse si los intervalos de confianza no se superponen.

En la última medición, al final del estudio, se encontró una interacción significativa humus×inoculante en la altura de la planta ($p = 0.023$), pero no así en diámetro. Dicha interacción indicó que el efecto de la inoculación fue significativo sólo en la dosis alta de humus. Es decir, en la dosis de 120 mL L⁻¹ de humus, las plantas inoculadas con *A. brasilense* tuvieron menor altura que

las no inoculadas. Por el contrario, en los niveles bajos de humus, las diferencias entre inocular y no inocular no fueron significativas (Figura 3).

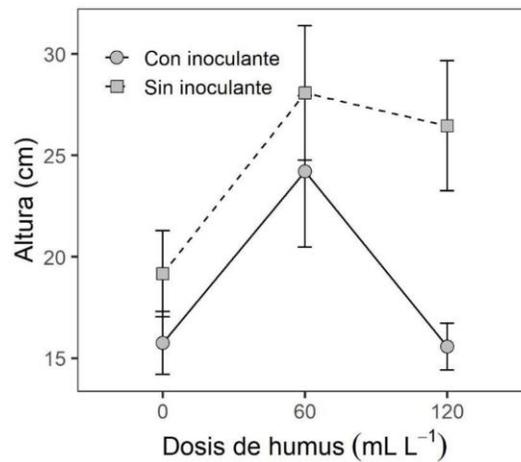


Figura 3. Promedios de altura de plantas de mezquite (*Prosopis laevigata*) a los 270 días después de siembra, como efecto combinado de la aplicación de humus líquido de lombriz e inoculación con *Azospirillum brasilense*. Los puntos representan valores promedio e intervalos de confianza al 95% (n = 24). Las diferencias entre tratamientos pueden inferirse si los intervalos de confianza no se superponen.

El análisis de varianza mostró un efecto significativo de la aplicación de humus sobre la producción de biomasa, en todos sus componentes (hoja, tallo y raíz). En todos los tejidos, se encontró un aumento significativo en la producción de biomasa con la dosis de 60 mL L⁻¹ de humus, en comparación con las plantas sin fertilizar. Por el contrario, la fertilización con dosis alta (120 mL L⁻¹) generó valores intermedios, sin diferencias con las plantas sin fertilización, particularmente en biomasa en hoja y raíz (Tabla 1). Por otro lado, no se encontró un efecto significativo de la inoculación con *A. brasilense* en la producción de biomasa, con respecto al tratamiento sin inoculación (Tabla 1).

Tabla 1. Valores promedio, error estándar y significancia estadística de las variables de producción de biomasa en plantas de mezquite (*Prosopis laevigata*) fertilizadas con diferentes dosis de enmiendas húmicas e inoculadas con *Azospirillum brasilense*.

Variable	Dosis de humus (H)			Azospirillum (A)		ANOVA (Valores p)		
	0	60	120	Sin	Con	H	A	H×A
BSH	0.16 ± 0.06b	0.47 ± 0.11a	0.22 ± 0.04ab	0.35 ± 0.09a	0.21 ± 0.05a	0.021	0.137	0.713
BST	0.11 ± 0.02b	0.69 ± 0.20a	0.44 ± 0.06a	0.49 ± 0.12a	0.34 ± 0.11a	<0.001	0.125	0.511
BSR	0.84 ± 0.15b	1.36 ± 0.16a	0.89 ± 0.11ab	1.10 ± 0.15a	1.00 ± 0.11a	0.043	0.690	0.578

BSH = Biomasa de hoja; BST = Biomasa de tallo; BSR = Biomasa de raíz. Para cada variable, las medias con letras distintas indican diferencias entre tratamientos.

DISCUSIÓN

En la presente investigación se evaluó el crecimiento de plantas de *P. laevigata* en respuesta a la fertilización con humus de lombriz en combinación con la inoculación con *A. brasilense* en la etapa de vivero. En primera instancia, los resultados confirmaron que la fertilización con humus líquido mejora el crecimiento de las plantas. Esto coincide con estudios previos en especies de *Prosopis* que han demostrado efectos positivos de la fertilización con humus líquido de lombriz (Shourije *et al.* 2014); aunque, en otros casos, no se ha encontrado un efecto significativo (González *et al.* 2018). En nuestro estudio, el efecto positivo de la fertilización con humus se encontró particularmente con la dosis media (60 mL L⁻¹), mientras que con dosis altas (120 mL L⁻¹) el efecto fue mínimo o nulo, para la mayoría de las variables, con respecto al tratamiento control sin fertilización.

A pesar de los beneficios ampliamente conocidos de las enmiendas húmicas, algunos estudios han mostrado efectos inhibidores del crecimiento cuando las se aplican en altas concentraciones (Lim *et al.* 2015). Estos efectos negativos están principalmente relacionados al aumento de las concentraciones de sales y el pH (Gutiérrez-Miceli *et al.* 2011). Si bien, las plantas de *P. laevigata* suelen ser tolerantes a la salinidad, altas concentraciones de sales en el sustrato (>5 dS m⁻¹) provocan una reducción en las tasas crecimiento en su etapa juvenil (Ríos-Gómez *et al.* 2010). Por lo tanto, en la práctica, es recomendable tener en cuenta estas limitaciones al momento de definir la dosis óptima de las enmiendas.

Por otra parte, contrario a lo esperado, se encontró que la inoculación con la bacteria *Azospirillum brasilense* no mejoró el crecimiento de las plantas de mezquite. Incluso, en combinación con la dosis alta de humus, la inoculación indujo una reducción significativa de crecimiento en altura. Estos resultados se contraponen a estudios en especies de *Prosopis*, los cuales muestran efectos positivos de la inoculación con *A. brasilense* sobre el crecimiento de las plantas (Leyva y Bashan 2008, Domínguez-Núñez *et al.* 2012, González *et al.* 2018). Aunque hay evidencia sólida que *Azospirillum* es un colonizador general de la rizosfera y, a su vez, promotor del crecimiento de las plantas en diversas especies vegetales, también es posible que algunas especies o cepas de *Azospirillum* muestren afinidad especie-específica (Pereg *et al.* 2016). Por lo tanto, en el presente estudio, es probable que no se haya establecido la asociación simbiótica debido a una falta de afinidad entre *A. brasilense* y *P. laevigata*. En otras especies arbóreas, estudios previos también han encontrado efectos nulos o negativos de la inoculación con *A. brasilense* sobre el desarrollo inicial de las plantas (Fernandes dos Santos *et al.* 2018, Cardoso-Felix *et al.* 2021).

Además de su capacidad de fijar N atmosférico, *Azospirillum* es un género de bacterias que pueden producir diferentes fitohormonas, incluyendo auxinas, citosinas y giberelinas (Cassán *et al.* 2020), las cuales estimulan el crecimiento de las plantas. No obstante, si bien, dichas hormonas estimulan el crecimiento de las plantas, en altas concentraciones pueden inhibirlo. Lo anterior se ha demostrado en cultivos agrícolas, donde la inoculación con *A. brasilense* en altas concentraciones inhibe el crecimiento de la raíz, atribuible a una abundancia elevada de fitohormonas, especialmente ácido indolacético (IAA) (Fukami *et al.* 2016, Dobbelaere *et al.* 2002). Por lo tanto, en el presente estudio, probablemente la dosis de inoculante empleada fue suficientemente alta para provocar menor crecimiento de las plantas, comparado con aquellas no inoculadas; lo cual podría ser objeto de análisis en futuras investigaciones.

Finalmente, la diferencia en los resultados entre el humus y *A. brasilense* señalan la necesidad de realizar investigaciones enfocadas en comprender mejor las interacciones específicas entre las plantas con distintos tipos biofertilizantes. Este estudio, aunque limitado a las condiciones y a una especie particular, contribuye a la creciente base de conocimientos sobre prácticas sostenibles y la optimización de técnicas de cultivo en vivero.

CONCLUSIONES

La fertilización con humus líquido de lombriz en tiene un efecto positivo en el crecimiento de las plantas de mezquite en etapa de vivero, principalmente cuando se aplica en una dosis media (60 mL L⁻¹). Por otra parte, en contra de la hipótesis planteada, la inoculación con *A. brasilense* no demostró ser benéfica en ninguna de las variables evaluadas, especialmente cuando se aplicó en combinación con una dosis alta de humus (120 mL L⁻¹).

AGRADECIMIENTOS

Al técnico Guadalupe Pérez Malacara por su ayuda en el llenado de bolsas y siembra. A los técnicos Enrique García y Luis Trejo por su ayuda durante todo el periodo de mantenimiento y riegos. A la química Elsa González Serna, por su asesoría en el uso de los instrumentos del laboratorio de química.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Aguirre-Medina JF, Mina-Briones FO, Cadena-Iñiguez J, Dardó-Zunun JD, Hernández-Sedas DA (2014) Crecimiento de *Cedrela odorata* L. biofertilizada con *Rhizophagus intraradices* y *Azospirillum brasilense* en vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(3): 177-186. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.01.001>
- Asif M, Mughal AH, Bisma R, Mehdi Z, Saima S, Ajaz M, Malik MA, Masood A, Siddique S (2018) Application of different strains of biofertilizers for raising quality forest nursery. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7(10): 3680-3686. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.710.425>
- Basave-Villalobos E, Valenzuela-Núñez LM, García-Rodríguez JL, Sarmiento-López H, García-Pérez JL, Calixto-Valencia CG, Sigala JA (2024) Morpho-physiological and biochemical responses in *Prosopis laevigata* seedlings to varied nitrogen sources. *Nitrogen* 5(4): 857-870. <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040055>

- Bashan LE, Hernández JP, Bashan Y (2012) The potential contribution of plant growth-promoting bacteria to reduce environmental degradation - A comprehensive evaluation. *Applied Soil Ecology* 61: 171-189. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.09.003>
- Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Cardoso-Felix F, Pereira de Matos DC, Porto-Latoh L, de Almeida Maggioni R, Nogueira AC (2021) *Azospirillum brasilense* inoculation on seed germination and initial growth of seedlings of native forest species. *Floresta* 51(4): 855-863. <https://doi.org/10.5380/rf.v51 i4. 73520>
- Carrillo-Parra A, Hapla F, Mai C, Garza-Ocañas F (2011) Durabilidad de la madera de *Prosopis laevigata* y efecto de sus extractos en hongos que degradan la madera. *Madera y Bosques* 17(1): 7-21. <https://doi.org/10.21829/myb.2011.1711151>
- Cassán F, Coniglio A, López G, Molina R, Nievas S, de Carlan CLN, Donadio F, Torres D, Rosas S, Olivera-Pedrosa F, de Souza E, Díaz-Zorita M, de-Bashan L, Mora V (2020) Everything you must know about *Azospirillum* and its impact on agriculture and beyond. *Biology and Fertility of Soils* 56: 461-479. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01463-y>
- Castro-Sowinski S, Herschkovitz Y, Okon Y, Jurkevitch E (2007) Effects of inoculation with plant growth-promoting rhizobacteria on resident rhizosphere microorganisms. *FEMS Microbiology Letters* 276(1): 1-11. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00878.x>
- Díaz-Batalla L, Hernández-Urbe JP, Román-Gutiérrez AD, Cariño-Cortés R, Castro-Rosas J, Téllez-Jurado A, Gómez-Aldapa CA (2018) Chemical and nutritional characterization of raw and thermal-treated flours of Mesquite (*Prosopis laevigata*) pods and their residual brans. *CYTA-Journal of Food* 16(1): 444-451. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1418433>
- Dobbelaere S, Croonenborghs A, Thys A, Ptacek D, Okon Y, Vanderleyden J (2002) Effect of inoculation with wild type *Azospirillum brasilense* and *A. irakense* strains on development and nitrogen uptake of spring wheat and grain maize. *Biology and Fertility of Soils* 36: 284-297. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0534-9>
- Domínguez-Núñez JA, Muñoz D, Planelles R, Grau JM, Artero F, Anriquez A, Albanesi A (2012) Effects of inoculation with *Azospirillum brasilense* on the quality of *Prosopis juliflora* seedlings. *Forest Systems* 21(3): 364-372. <https://doi.org/10.5424/fs/2012213-02135>
- Fernandes dos Santos R, da Cruz SP, Botelho GR, Vasconcelos-Flores A (2018) Inoculation of *Pinus taeda* seedlings with plant growth-promoting rhizobacteria. *Floresta e Ambiente* 25(1): e20160056. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.005616>
- Fibach-Paldi S, Burdman S, Okon Y (2012) Key physiological properties contributing to rhizosphere adaptation and plant growth promotion abilities of *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiology Letters* 326(2): 99-108. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02407.x>
- Fox J, Weisberg S (2011) *An R companion to applied regression*, 2nd edition. Sage Publications, Thousand Oaks, CA. 608p.
- Fukami J, Nogueira MA, Araujo RS, Hungria M (2016) Accessing inoculation methods of maize and wheat with *Azospirillum brasilense*. *AMB Express* 6: 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13568-015-0171-y>
- García-Monjaras S, Santos-Díaz RE, Flores-Najera MJ, Cuevas-Reyes V, Meza-Herrera CA, Mellado M, Chay-Canul AJ, Rosales-Nieto CA (2021) Diet selected by goats on xerophytic shrubland with different milk yield potential. *Journal of Arid Environments* 186: 104429. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104429>
- Gonzalez EJ, Hernandez JP, de-Bashan LE, Bashan Y (2018) Dry micro-polymeric inoculant of *Azospirillum brasilense* is useful for producing mesquite transplants for reforestation of degraded arid zones. *Applied Soil Ecology* 129: 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.04.011>

- Gutiérrez-Miceli FA, García-Gómez RC, Oliva-Llaven MA, Montes-Molina JA, Dendooven L (2017) Vermicomposting leachate as liquid fertilizer for the cultivation of sugarcane (*Saccharum* sp.). *Journal of Plant Nutrition* 40(1): 40-49. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1193610>
- Gutiérrez-Miceli FA, Llaven MAO, Nazar PM, Sesma BR, Álvarez-Solís JD, Dendooven L (2011) Optimization of vermicompost and worm-bed leachate for the organic cultivation of radish. *Journal of Plant Nutrition* 34(11): 1642-1653. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.592561>
- Juntunen ML, Hammar T, Rikala R (2002) Leaching of nitrogen and phosphorus during production of forest seedlings in containers. *Journal of Environmental Quality* 31(6): 1868-1874. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1868>
- Koskey G, Avio L, Turrini A, Sbrana C, Bàrberi P (2023) Biostimulatory effect of vermicompost extract enhances soil mycorrhizal activity and selectively improves crop productivity. *Plant and Soil* 484(1): 183-199. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05783-w>
- Lenth R (2019) emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.4.7.
- Leyva LA, Bashan Y (2008) Activity of two catabolic enzymes of the phosphogluconate pathway in mesquite roots inoculated with *Azospirillum brasilense* Cd. *Plant Physiology and Biochemistry* 46(10): 898-904. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.011>
- Lim SL, Wu TY, Lim PN, Shak KPY (2015) The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95(6): 1143-1156. <https://www.doi.org/10.1002/jsfa.6849>
- Mata-Balderas JM, Cavada-Prado KA, Sarmiento-Muñoz TI, González-Rodríguez H (2022) Monitoreo de la supervivencia de una reforestación con especies nativas del matorral espinoso tamaulipeco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 13(71): 28-52. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1229>
- Molina-Guerra VM, Mora-Olivo A, Alanís-Rodríguez E, Soto-Mata BE, Patiño-Flores AM (2019) Plantas características del matorral espinoso tamaulipeco en México. 1ra. Edición. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, México. 114p.
- Monroy-Ata A, Estevez-Torres J, García-Sánchez R, Ríos-Gómez R (2007) Establecimiento de plantas mediante el uso de micorrizas y de islas de recursos en un matorral xerófilo deteriorado. *Botanical Sciences* 80(S): 49-57. <https://doi.org/10.17129/botsci.1756>
- Moridi A, Zarei M, Moosavi AA, Ronaghi A (2021) Effect of liquid organic fertilizers and soil moisture status on some biological and physical properties of soil. *Polish Journal of Soil Science* 54(1): 41-58. <https://doi.org/10.17951/pjss/2021.54.1.41>
- Muro-González DA, Mussali-Galante P, Valencia-Cuevas L, Flores-Trujillo K, Tovar-Sánchez E (2020) Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research* 27(32): 40187-40204. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10026-5>
- Patiño-Flores AM, Alanís-Rodríguez E, Molina-Guerra VM, González-Rodríguez H, Jurado E, Aguirre-Calderón OA (2019) Almacenamiento de carbono en la reserva ecológica de Ternium en Pesquería, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 10(54): 39-57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i54.498>
- Pereg L, de-Bashan LE, Bashan Y (2016) Assessment of affinity and specificity of *Azospirillum* for plants. *Plant and Soil* 399: 389-414. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2778-9>
- Prieto-Ruiz JA, Aldrete A, Hernández-Díaz JC, Goche-Télles JR (2016) Causas de mortalidad de las reforestaciones y propuestas de mejora. En: Prieto-Ruiz JA, Goche-Télles JR (compiladores). *Las Reforestaciones en México. Problemas y alternativas de solución*. UJED. Durango, México. pp. 55-66.
- Quiñones-Gutiérrez A, González-Ontiveros V, Chávez-Pérez JR, Vargas-Martínez A, Barrientos-Díaz F (2013) Evaluación de inoculantes promotores de crecimiento en la producción de plantas de mezquite

- [*Prosopis laevigata* (Humb. Et Bonpl. ex Willd.) MC Johnst.] en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(20): 42-80. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i20.371>
- R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2024.
- Ríos-Gómez R, Salas-García CE, Monroy-Ata A, Solano E (2010) Salinity effect on *Prosopis laevigata* seedlings. *Terra Latinoamericana* 28(2): 99-107.
- Rodríguez-Sauceda EN, Rojo-Martínez GE, Ramírez-Valverde B, Martínez-Ruiz R, Cong-Hermida MC, Medina-Torrez SM, Piña-Ruiz HH (2014) Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai* 10(3): 173-193.
- Shourije FA, Sadeghi H, Pessaraki M (2014) Effects of different types of composts on soil Characteristics and morphological traits of two dry rangeland species. *Journal of Plant Nutrition* 37(12): 1965-1980. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.911323>
- Tang Q, Cotton A, Wei Z, Xia Y, Daniell T, Yan X (2022) How does partial substitution of chemical fertiliser with organic forms increase sustainability of agricultural production? *Science of the Total Environment* 803: 149933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149933>
- Vásquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, Hernández-Sandoval L, Francois-Parrot J, Nearing M (2010) Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena* 80(3): 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.11.003>
- Villegas-Espinoza JA, Rueda-Puente EO, Murillo-Amador B, Puente ME, Grimaldo-Juárez O, Avilés-Marín SM, Ponce-Medina JF (2010) Efecto de la inoculación de *Azospirillum halopraeferens* y *Bacillus amyloliquefaciens* en la germinación de *Prosopis chilensis*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12(1): 19-32.
- Xue J, Bakker M, Milin S, Graham D (2022) Enhancement in soil fertility, early plant growth and nutrition and mycorrhizal colonization by vermicompost application varies with native and exotic tree species. *Journal of Soils and Sediments* 22: 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03180-5>