



Establecimiento de plantas de *Vachellia farnesiana* inoculadas con hongos micorrícicos arbusculares en condiciones de invernadero

Montserrat Ceballos-Díaz (<https://orcid.org/0009-0008-7989-7813>)

Arcadio Monroy-Ata (<https://orcid.org/0000-0001-8718-5076>)

Abigail Díaz-Armendáriz (<https://orcid.org/0009-0006-3166-7424>)

Gilberto Alemán-Sancheschúlz* (<https://orcid.org/0000-0002-4351-4998>)

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Batalla 5 de mayo s/n, Ejército de Oriente Zona Peñón, Iztapalapa, Ciudad de México, C. P.
09230, México.

*Autor para correspondencia: gilberto.aleman.fesz@gmail.com

Resumen

El huizache (*Vachellia farnesiana*) es una especie ampliamente utilizada como leña, cuya sobreexplotación ha reducido su población. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la inoculación con el hongo micorrícico arbuscular (HMA) *Rhizophagus irregularis* sobre el desarrollo de huizache cultivado en macetas en condiciones de invernadero. Se establecieron dos tratamientos: plantas inoculadas (HMA+) y plantas sin inocular (HMA-), con 25 repeticiones por tratamiento. Semanalmente se registraron la altura, el número de pinnas, el área foliar, la evapotranspiración real y la transpiración. A los seis meses se determinaron la biomasa fresca y seca total, la relación raíz/vástago, la tasa de crecimiento



relativo, la eficiencia del uso del agua, el potencial hídrico foliar y el porcentaje de colonización micorrícica. Las plantas HMA⁺ presentaron incrementos significativos en altura, número de pinnas, área foliar, biomasa total, tasa de crecimiento relativo y eficiencia del uso del agua, así como una mejor retención hídrica, en comparación con las plantas HMA⁻. Es decir, la inoculación con *R. irregularis* favorece el crecimiento y la eficiencia del uso del agua del huizache durante su establecimiento en invernadero, lo que evidencia el potencial de la micorrización como estrategia para el establecimiento y desarrollo vegetal de esta especie.

Palabras clave: huizache, ecofisiología, establecimiento vegetal, micorrizas, potencial hídrico, tolerancia a la sequía, tasa de crecimiento relativo.

Recibido: 17/01/2026

Aceptado: 13/07/2026

Introducción

El crecimiento de la vegetación en las zonas áridas y semiáridas se ve limitado por la baja disponibilidad de agua, derivada de precipitaciones escasas e irregulares, así como por la elevada evaporación asociada a temperaturas extremas (Palacios-Romero et al., 2016; Tarango-Arámbula, 2005). Estas condiciones generan estrés hídrico, el cual reduce la productividad vegetal y altera procesos fisiológicos clave, como la transpiración, la eficiencia del uso del agua y el estado hídrico foliar. Además, la degradación del suelo limita la disponibilidad de nutrientes y aumenta la vulnerabilidad de las plantas durante su establecimiento y desarrollo (Palacios-Romero et al., 2016). En consecuencia, es necesario establecer estrategias que mejoren la capacidad de las plantas para aprovechar los recursos ambientales, particularmente el agua (Augé, 2001; Ruiz-Lozano, 2003).



Entre las alternativas biotecnológicas disponibles destaca la inoculación con hongos micorrícicos arbusculares (HMA), organismos que establecen una asociación endosimbiótica mutualista con las raíces. En esta interacción, los hongos obtienen compuestos de carbono derivados de la fotosíntesis, mientras que las plantas mejoran la absorción de nutrimentos y agua, lo que favorece su crecimiento y tolerancia al estrés hídrico (Smith & Read, 2008; Smith & Smith, 2011). Adicionalmente, los HMA contribuyen a la rehabilitación de suelos degradados al promover la agregación de partículas, mejorar la estructura del suelo y favorecer la dinámica de nutrimentos (Carrillo-Saucedo et al., 2022).

Los HMA se asocian con aproximadamente el 80 % de las plantas vasculares y desempeñan un papel clave en ecosistemas áridos y semiáridos, donde las limitaciones hídricas y nutrimentales son frecuentes (Lutzoni et al., 2018; Montaña et al., 2012; Smith & Read, 2008). Su red de hifas extrarradicales incrementa el volumen de suelo explorado por las raíces y favorece la captación de agua y nutrimentos (Carrillo-Saucedo et al., 2022). No obstante, debido a su simbiosis obligada, estos hongos dependen de la planta hospedera para completar su ciclo de vida (Camarena-Gutiérrez, 2012; Smith & Read, 2008; Varela et al., 2019).

Entre los HMA de mayor interés se encuentra *Rhizophagus irregularis*, especie ampliamente utilizada en estudios de establecimiento vegetal y tolerancia al estrés hídrico debido a su elevada plasticidad funcional, amplia compatibilidad con diversas especies vegetales y capacidad para mejorar el estado hídrico y nutricional de las plantas hospedantes (Wang et al., 2022; Wen et al., 2025). Estas características han favorecido su aplicación tanto en sistemas de producción vegetal como en programas de restauración ecológica.

Por su parte, *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. (Fabaceae), conocida comúnmente como huizache, es una especie arbórea de importancia ecológica y económica, caracterizada por su tolerancia a altas temperaturas y sequías (Cortés-Cabrera et al., 2018; López-Camacho et al., 2012). En México se distribuye en la vertiente del Pacífico, en la Mesa Central y, de forma discontinua, en la vertiente del Atlántico, entre los 36 y 2 500 m s. n. m. (Barrientos-Ramírez et al., 2012; Cortés-Cabrera et al., 2018). Esta especie ha sido empleada en programas de restauración de ecosistemas degradados debido a su capacidad de fijar nitrógeno, mejorar la fertilidad del suelo y actuar como planta nodriza (Alcalá-Rojas et al., 2025; Erkovan et al., 2016; García-Sánchez & López-Hernández, 2024).



A pesar de la relevancia ecológica de *V. farnesiana* y del potencial de los HMA para mejorar el desempeño vegetal bajo condiciones de sequía, en México la información disponible sobre esta interacción es limitada. Los estudios realizados se han enfocado principalmente en variables de crecimiento, contenido foliar de fósforo, supervivencia y porcentaje de colonización micorrícica (Hernández-Martínez et al., 2006). En contraste, existe escasa información sobre las respuestas ecofisiológicas asociadas con la micorrización de esta especie, como la eficiencia del uso del agua, la transpiración y el potencial hídrico foliar durante las etapas tempranas de establecimiento.

Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que la inoculación de *V. farnesiana* con *R. irregularis* favorece el establecimiento de las plantas al incrementar su tasa de crecimiento relativo en altura y mejorar su eficiencia en el uso del agua. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la inoculación con el HMA *R. irregularis* sobre el crecimiento, la eficiencia del uso del agua, el estado hídrico y la colonización micorrícica de *V. farnesiana* cultivada en condiciones de invernadero.

Materiales y métodos

Establecimiento del experimento y diseño experimental

El estudio se realizó en el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (19° 22' 38'' N y 99° 01' 99'' O). El invernadero se mantuvo con ventilación natural mediante puertas y ventanas abiertas. Durante el periodo experimental, la temperatura osciló entre 10.8 y 32.1 °C. En primavera,



el fotoperiodo varió de 10 h 58 min a 13 h 18 min de luz y de 10 h 42 min a 13 h 03 min de oscuridad, mientras que la humedad relativa fue de 25 % al mediodía.

Se evaluaron dos tratamientos: plantas inoculadas con *R. irregularis* (HMA+) y plantas no inoculadas (HMA-), con 25 repeticiones por tratamiento. Las plantas se cultivaron durante seis meses en recipientes de PVC de 7.2 cm de diámetro y 24.1 cm de altura, sin perforación de drenaje para cuantificar la pérdida de agua del sistema por evaporación. Adicionalmente, se incluyeron cinco recipientes sin plantas para estimar la evaporación del sustrato. Cada recipiente contenía 1 100 g de sustrato estéril, el cual consistió en una mezcla homogénea de suelo y arena sílica (1:1, v/v). En el tratamiento HMA+ se adicionaron 5 g de inóculo micorrízico y 1095 g de sustrato estéril.

La especie utilizada fue *V. farnesiana* (L.) Wight & Arn. (Fabaceae). Las vainas se recolectaron en el vivero de la facultad durante el otoño de 2021. Las semillas se extrajeron y se sometieron a un tratamiento pregerminativo mediante inmersión en agua en ebullición durante 15 min y escarificación física (Flores & Jurado, 1998). Posteriormente, se germinaron en cajas de Petri a temperatura ambiente (19–27 °C). Después de la emergencia radicular, se seleccionaron plántulas homogéneas en tamaño y morfología, las cuales se trasplantaron individualmente a una profundidad de 2 cm (Parrotta, 1992).

Inoculación micorrízica

La inoculación se realizó con *R. irregularis* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüssler (Glomeraceae), del inóculo comercial MicorrizaFer PLUS (BIOfábrica Siglo XXI, México). De acuerdo con la ficha técnica, el producto contiene 100 propágulos por gramo de inóculo, de los cuales aproximadamente el 30 % corresponde a esporas y el 70 % a fragmentos de raíz de plantas hospedantes.



Con el fin de corroborar la composición del inóculo, se realizó una cuantificación independiente de esporas de acuerdo con el método de Ohms (1957), modificado por Sieverding (1983). Se suspendieron 50 g de inóculo en 650 mL de agua destilada y se agitaron manualmente durante 15 min. El sobrenadante se filtró en tamices de 1 mm y 44 μ m. El material retenido se lavó, centrifugó y resuspendió en una solución de agua con azúcar al 50 % (v/p). Las esporas se contaron con ayuda de un microscopio estereoscópico (VE-S5, Velab™, China). La dosis aplicada fue de 5 g por recipiente en el tratamiento HMA+.

Manejo hídrico

El riego se aplicó semanalmente a capacidad de campo (CC) durante 21 semanas. La CC se determinó mediante cinco repeticiones de acuerdo con Muñoz-Iniestra et al. (2013); para ello, se colocaron 100 g de sustrato en un embudo con papel filtro y se adicionaron 100 mL de agua destilada. Después de 24 h de drenaje gravitacional, se determinó el contenido de agua retenida y el valor obtenido se extrapola a 1 100 g de sustrato por recipiente.

Al inicio del experimento, todos los recipientes se llevaron a CC. Posteriormente, cada semana se registró el peso de cada recipiente con una balanza de precisión (0.1 g) antes del riego y se adicionó el volumen de agua necesario para restablecer la CC. Este procedimiento permitió estimar el consumo de agua de cada tratamiento y calcular la evaporación, la transpiración y la evapotranspiración acumuladas.

Evaluación de variables de crecimiento y fisiología vegetal



Una semana después del trasplante, se inició el registro semanal de la altura de planta (cm), el número de pinnas y el área foliar. Asimismo, se estimaron la evapotranspiración real (ETR), la evaporación (Ev) y la transpiración (Tr) mediante diferencias de peso; para ello, se utilizó una báscula portátil (YS Series, OHAUS®, EUA). La ETR se estimó mediante la pérdida semanal de peso de los recipientes con plantas. La Ev se calculó en los recipientes sin plantas a partir de la diferencia entre el peso del recipiente previo al riego y el correspondiente a la semana anterior a CC. La Tr se obtuvo por diferencia ($Tr = ETR - Ev$), considerando que la ETR integra ambos procesos (Kool et al., 2014). Los registros se realizaron durante 21 semanas.

Al finalizar el experimento, se cosecharon al azar cinco plantas por tratamiento para realizar las determinaciones ecofisiológicas y de biomasa. El potencial hídrico foliar se midió al alba mediante una cámara de presión (modelo 600, PMS Instrument Company, EUA) (Alemán-Sancheschúlz et al., 2019; Choque-Choque & Arragan-Tancara, 2022; Scholander et al., 1965). Posteriormente, las plantas se separaron en raíz y vástago y se secaron en estufa a 60–70 °C hasta peso constante. Se determinó la biomasa seca de cada órgano y se calculó la relación raíz/vástago (R/V).

La tasa de crecimiento relativo (TCR) se calculó a partir de las alturas inicial y final de las plantas mediante un modelo de crecimiento exponencial ajustado al periodo experimental de 147 días (Herrera Valencia et al., 2010).

La eficiencia del uso del agua (EUA) se estimó dividiendo el peso seco total (raíz y vástago, en g) entre la cantidad promedio total de agua irrigada durante el experimento (kg) (Katerji & Mastrorilli, 2014; Medrano-Gil et al., 2007).

Colonización micorrícica



El porcentaje de colonización micorrícica total (CT %) se determinó en raíces de *V. farnesiana* mediante la técnica de Phillips y Hayman (1970). Se analizaron de 10 a 15 segmentos de raíces (~2.5 cm), montados en portaobjetos con lactoglicerol, en un microscopio compuesto (WB-3T, Iroscope, México) para identificar hifas, vesículas y arbuscúlos. El CT se calculó como la proporción de puntos colonizados respecto al total de puntos observados y se expresó en porcentaje (Ferrera-Cerrato et al., 1993).

Análisis de los datos

Los datos se sometieron a pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y de homogeneidad de varianzas (Levene). Con base en los resultados, se aplicaron pruebas no paramétricas de Kruskal–Wallis para evaluar la altura de planta, el número de pinnas, el área foliar, la transpiración acumulada y la ETR. Asimismo, se utilizaron pruebas U de Mann–Whitney para comparar el peso seco, la eficiencia del uso del agua, el potencial hídrico foliar y la relación R/V entre los tratamientos. Las TCR y el CT se analizaron mediante pruebas t de Student. Todos los análisis se realizaron con los programas Minitab 18 (Minitab Inc.) e InfoStat (Grupo InfoStat, versión 2020), con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Resultados y discusión

Caracterización del inóculo



El inóculo presentó un promedio de 164 esporas por 100 g, lo que indica una densidad adecuada para el establecimiento de la micorrización. Este valor se encuentra en el intervalo reportado en estudios donde se han observado respuestas positivas en plantas hospederas aun con densidades moderadas de inóculo, siempre que exista compatibilidad funcional entre el hongo y la especie vegetal (Carrillo-Saucedo et al., 2022). No obstante, la abundancia de esporas no constituye por sí sola un indicador directo de la capacidad infectiva del inóculo, ya que esta también depende de la viabilidad y la funcionalidad de otros propágulos, como los fragmentos de raíz, así como de la compatibilidad con la planta hospedera. En el presente estudio, la funcionalidad del inóculo se corroboró mediante la colonización micorrícica observada en las raíces de *V. farnesiana* y la respuesta positiva registrada en las variables de crecimiento.

Crecimiento vegetal

Las plantas del tratamiento HMA+ presentaron valores significativamente mayores de altura ($H = 46.50, p = 0.000$), número de pinnas ($H = 72.56, p = 0.000$) y área foliar ($H = 91.06, p = 0.000$), respecto a los individuos del tratamiento HMA-. En promedio, las plantas con HMA+ alcanzaron 37.24 cm de altura, 141.70 pinnas y 8.40 cm² de área foliar, mientras que las plantas HMA- registraron 20.82 cm de altura, 60.88 pinnas y 5.66 cm² de área foliar. Las diferencias entre tratamientos fueron evidentes a partir de la quinta semana del experimento (Figura 1).

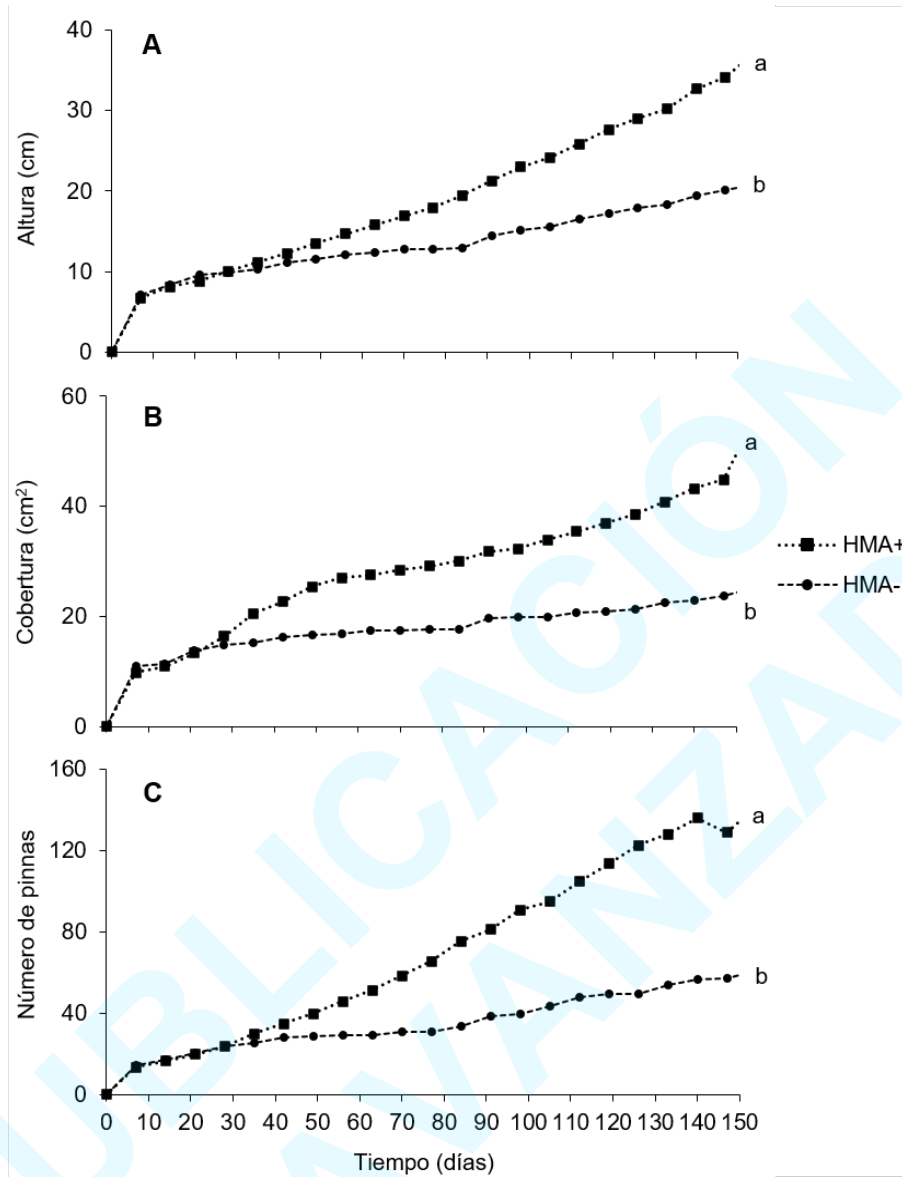


Figura 1. Altura (A), área foliar (B) y número de pinnas (C) de plantas de *Vachellia farnesiana* inoculadas con *Rhizophagus irregularis* (HMA+) y no inoculadas (HMA-) durante 21 semanas de evaluación. Letras distintas indican diferencias significativas en la última fecha de registro (Tukey, $p \leq 0.05$).

Durante las primeras semanas, las plantas HMA+ mostraron un crecimiento ligeramente menor, lo cual podría estar relacionado con el gasto inicial de carbono asociado con el establecimiento de la simbiosis micorrícica. Los HMA requieren tiempo y un suministro inicial de carbohidratos para colonizar el sistema radicular (Carrillo-Saucedo et al., 2022).



Una vez establecida la asociación, aproximadamente después de 21 días, las plantas HMA+ mostraron una trayectoria de crecimiento superior a la del testigo, en concordancia con lo reportado por Chen et al. (2018).

Las diferencias observadas sugieren que la micorrización favoreció la adquisición y aprovechamiento de los recursos disponibles en el sustrato (Delgado-Silva & Gutiérrez-Montoya, 2022), lo que se reflejó en un mayor crecimiento vegetal. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Hernández-Martínez et al. (2006), quienes observaron un aumento en la altura, el número de hojas, el área foliar y la biomasa de *V. farnesiana* inoculado con HMA.

Tasa de crecimiento relativo y biomasa

La TCR fue significativamente mayor en las plantas HMA+ que en las plantas testigo ($t = -7.760$, $p = 0.000$). Las plantas con HMA+ presentaron una TCR de 0.0228 d^{-1} , mientras que las plantas HMA- registraron 0.0170 d^{-1} . El peso seco también fue mayor en las plantas HMA+ ($W = 15.50$, $p = 0.016$; Cuadro 1), las cuales desarrollaron un sistema radical más abundante y una mayor proporción de raíces finas. En contraste, la relación R/V no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($W = 25.20$, $p = 0.754$; Cuadro 1), lo que indica que el incremento de biomasa ocurrió de manera proporcional en ambos órganos.

Cuadro 1. Comparación de medias de la biomasa seca, relación raíz/vástago (R/V) y eficiencia del uso del agua de *Vachellia farnesiana* inoculado con el hongo micorrízico arbuscular *Rhizophagus irregularis*.

Tratamiento	Peso seco (g)		R/V	EUA ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	Vástago	Raíz		



HMA–	0.48 a	0.18 a	0.39 a	0.046 a
HMA+	1.48 b	0.72 b	0.45 a	0.112 b

EUA = eficiencia del uso del agua; HMA– = plantas sin inóculo; HMA+ = plantas inoculadas. Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

El aumento de biomasa observado en las plantas micorrizadas concuerda con estudios que atribuyen este efecto a una mayor absorción de nutrientes y al incremento de la superficie efectiva de absorción proporcionada por las hifas extrarradicales (Chen et al., 2018). Además, la micorrización puede estimular la ramificación y el crecimiento de raíces finas, lo que incrementa el contacto con el sustrato y favorece la captación de agua (Bennett & Groten, 2022). En conjunto, los resultados indican que la inoculación con *R. irregularis* promovió un crecimiento más eficiente de *V. farnesiana* durante su establecimiento en condiciones de invernadero.

Estado hídrico y eficiencia del uso del agua

El potencial hídrico foliar fue significativamente diferente entre los tratamientos (Figura 2). Las plantas HMA+ presentaron -2.68 MPa, mientras que las plantas HMA– alcanzaron únicamente -0.95 MPa, lo que evidencia una mayor retención hídrica de las plantas micorrizadas bajo las condiciones experimentales evaluadas. El potencial hídrico foliar determina la dirección del flujo de agua a través del xilema, el cual ocurre desde regiones con potencial menos negativo hacia regiones con potencial más negativo, como las hojas (Aleman-Sancheschulz et al., 2019).

Los valores más negativos observados en las plantas micorrizadas podrían estar relacionados con una mayor demanda transpiratoria asociada con ajustes fisiológicos que mantienen el

gradiente del flujo de agua hacia la parte aérea (Adhikari & White, 2014; Hsiao et al., 1976; Yang et al., 2021). Debido a que las plantas se mantuvieron bajo condiciones hídricas controladas, los resultados obtenidos se pueden interpretar como una mejora en la retención hídrica de las plantas micorrizadas y no como evidencia de tolerancia a la sequía.

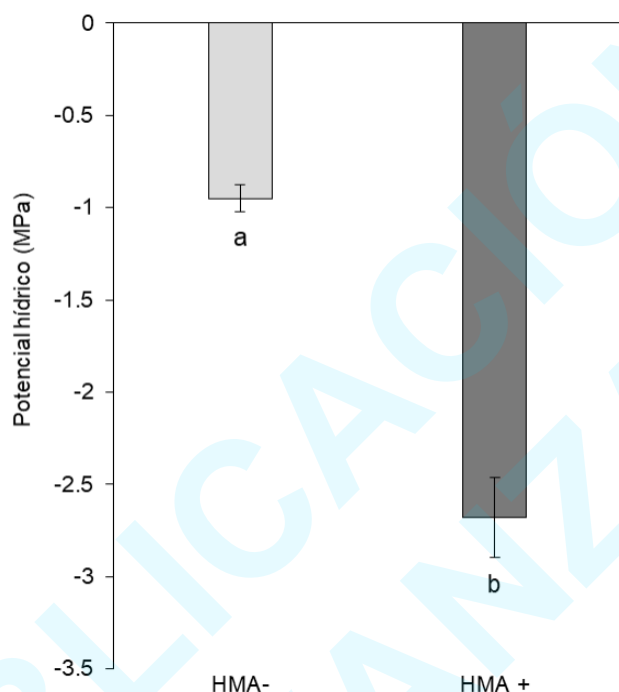


Figura 2. Potencial hídrico foliar de plantas de *Vachellia farnesiana* al final del experimento inoculadas con *Rhizophagus irregularis* (HMA+) y no inoculadas (HMA-). Las barras corresponden al promedio $\pm$ el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

La eficiencia del uso del agua (EUA) fue significativamente mayor en las plantas HMA+ ($W = 16.0$, $p = 0.022$, Cuadro 1). Este resultado indica que las plantas micorrizadas produjeron más biomasa seca por unidad de agua utilizada, lo que refleja un aprovechamiento más eficiente del recurso hídrico bajo las condiciones evaluadas (Moura & Vieira, 2020). En conjunto, los resultados sugieren que la asociación con HMA puede contribuir a mejorar el crecimiento de *V. farnesiana* durante su establecimiento en condiciones de invernadero (Delgado-Silva & Gutiérrez-Montoya, 2022).



Transpiración y evapotranspiración real

La ETR y Tr fueron significativamente mayores en las plantas HMA⁺ que en las HMA⁻ a partir del día 96 del experimento (Figura 3). Este comportamiento se puede atribuir al mayor número de pinnas y a la mayor área foliar de las plantas micorrizadas, lo que aumentó la superficie transpiratoria disponible. Los resultados refuerzan la idea de que la micorrización favoreció la actividad fisiológica y el uso más eficiente del agua en las plantas HMA⁺ (López-Avendaño et al., 2015). Asimismo, los valores de transpiración sugieren un mayor flujo de agua a través del sistema planta-sustrato en las plantas HMA⁺, lo que coincide con su mayor desarrollo vegetativo durante el periodo experimental.

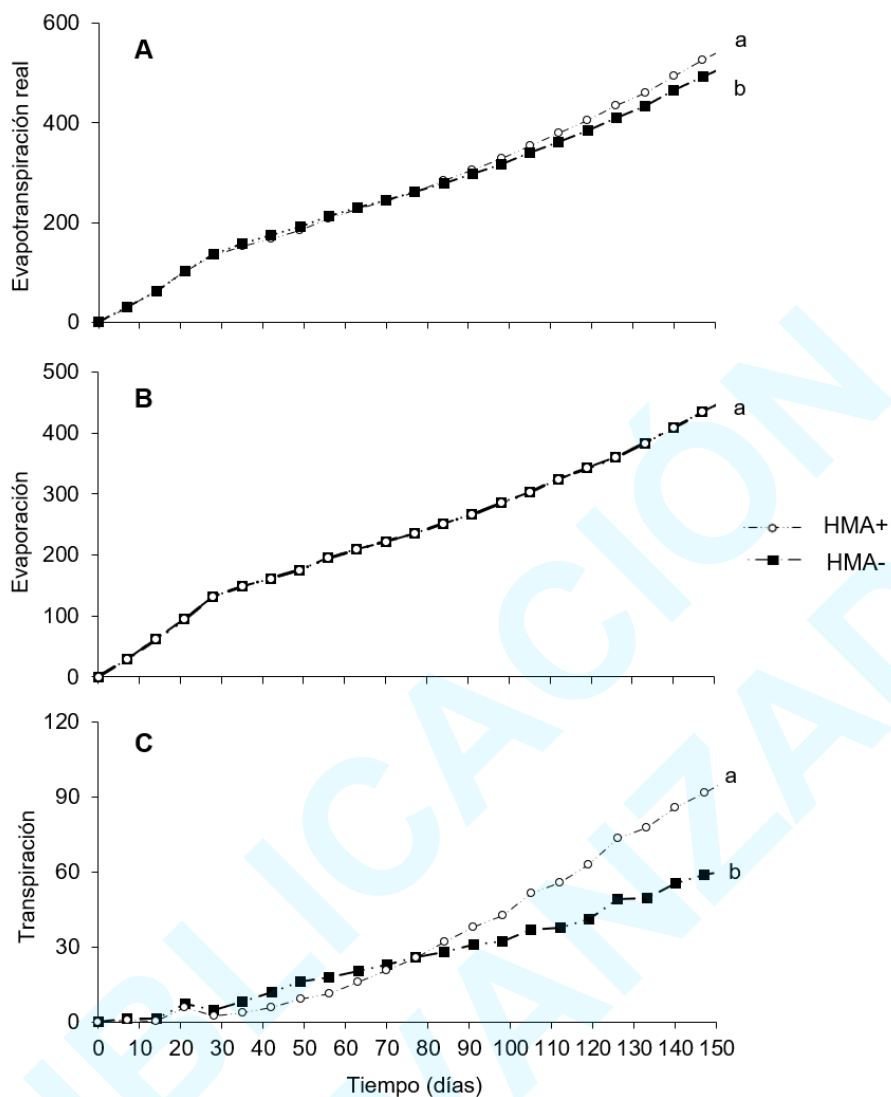


Figura 3. Evapotranspiración real (A), evaporación (B) y transpiración (C) promedio acumuladas de plantas de *Vachellia farnesiana* inoculadas con *Rhizophagus irregularis* (HMA+) y no inoculadas (HMA-) durante 21 semanas de evaluación. Letras distintas indican diferencias significativas en la última fecha de registro (Tukey, $p \leq 0.05$).

Colonización micorrícica

La CT presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($t = -8.08$, $p = 0.015$). Las plantas HMA+ mostraron 37.7 % de hifas y 5.5 % de vesículas, mientras que en las plantas HMA- se observó únicamente 16.5 % de hifas; en ninguno de los tratamientos se detectaron arbuscúlos (Figura 4).

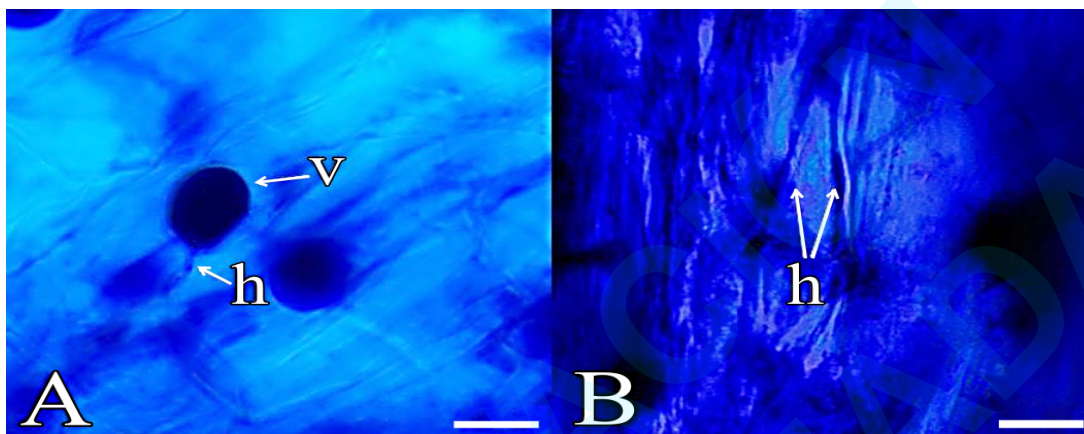


Figura 4. Estructuras formadas por *Rhizophagus irregularis* en raíces de *Vachellia farnesiana*. h = hifas, v = vesículas. Escala = 10 μ m.

La mayor colonización observada en las plantas inoculadas confirma el establecimiento efectivo de *R. irregularis* en las raíces de *V. farnesiana* y coincide con las respuestas positivas registradas en crecimiento, biomasa y eficiencia del uso del agua. Aunque el porcentaje de colonización fue moderado, la simbiosis resultó funcional bajo las condiciones del experimento. Diversos estudios indican que la efectividad de la simbiosis no depende exclusivamente del grado de colonización (Courty et al., 2010; Hernández-Martínez et al., 2006; Sangabriel-Conde et al., 2010), sino también de la funcionalidad de la interacción hongo-planta (Carrillo-Saucedo et al., 2022; López-Gómez et al., 2015; Plascencia-Escalante et al., 1997). Por lo tanto, la asociación entre *V. farnesiana* y *R. irregularis* fue suficiente para contribuir al desempeño de las plantas inoculadas.



Conclusiones

La inoculación con *R. irregularis* promovió significativamente el crecimiento de *V. farnesiana* en condiciones de invernadero, al incrementar la altura, el número de pinnas, el área foliar, la biomasa seca y la tasa de crecimiento relativo. Asimismo, las plantas micorrizadas presentaron una mayor eficiencia en el uso del agua y un mayor desarrollo radical, lo que sugiere un mejor aprovechamiento de los recursos del sustrato.

La colonización micorrícica observada confirmó el establecimiento funcional de la simbiosis. En conjunto, los resultados destacan el potencial de *R. irregularis* como una herramienta biotecnológica para mejorar el establecimiento y desarrollo de *V. farnesiana* en programas de rehabilitación ecológica de zonas áridas y semiáridas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo económico a través del proyecto PAPIIT IN218121.

Referencias

- Adhikari, A., & White, J. D. (2014). Plant water use characteristics of five dominant shrub species of the Lower Rio Grande Valley, Texas, USA: implications for shrubland restoration and conservation. *Conservation Physiology*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.1093/conphys/cou005>
- Alcalá-Rojas, A., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Cuellar-Rodríguez, G., Yerena-Yamellel, I., Martínez-Adriano, C. A., & Sandoval-García, R. (2025). Análisis de la regeneración natural en un área restaurada de 11 años en el matorral espinoso



- tamaulipeco. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 22, 72–82. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v22i50.7756>
- Alemán-Sancheschúlz, G., Solano, E., Terrazas, T., & López-Portillo, J. (2019). La arquitectura hidráulica de las plantas vasculares terrestres, una revisión. *Madera y Bosques*, 25(3), 1–17. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2531828>
- Augé, R. M. (2001). Water relations, drought and vesicular–arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11, 3–42. <https://doi.org/10.1007/s005720100097>
- Barrientos-Ramírez, L., Vargas-Radillo, J. J., Rodríguez-Rivas, A., Ochoa-Ruíz, H. G., Navarro-Arzate, F., & Zorrilla, J. (2012). Evaluación de las características del fruto de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.) para su posible uso en curtiduría o alimentación animal. *Madera y Bosques*, 18(3), 23–35. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.183356>
- Bennett, A. E., & Groten, K. (2022). The costs and benefits of plant–arbuscular mycorrhizal fungal interactions. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), 649–672. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>
- Camarena-Gutiérrez, G. (2012). Interacción planta-hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 409–421. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.093>
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129, 22. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>
- Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., & Reinhardt, D. (2018). Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi—from ecology to application. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1270. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01270>
- Choque-Choque, Y., & Arragan-Tancara, F. B. (2022). Programación de riego deficitario controlado y volumen de agua consumido por tres ecotipos de papalisa (*Ullucus tuberosus* Caldas.). *Apthapi*, 8(2), 2381–2392. <https://doi.org/10.53287/aevy8046fp84j>



- Cortés-Cabrera, H. E., Pérez-Domínguez, R., Flores, J., González-Tagle, M., Cuéllar-Rodríguez, G., & Jurado, E. (2018). Germinación de dos especies del género *Acacia* a temperaturas elevadas simulando cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 304–322. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.248>
- Courty, P. E., Buée, M., Diedhiou, A. G., Frey-Klett, P., Le Tacon, F., Rineau, F., Turpault, M.P., Uroz, S., & Garbaye, J. (2010). The role of ectomycorrhizal communities in forest ecosystem processes: new perspectives and emerging concepts. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 679–698. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.12.006>
- Delgado-Silva, H. D., & Gutiérrez-Montoya, L. V. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 2–14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>
- Erkovan, H. İ., Clarke, P. J., & Whalley, R. D. (2016). A review on general description of *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 47(1), 71–76. <https://izlik.org/JA73MT29FA>
- Ferrera-Cerrato, R., González-Chávez, M. C. A., & Rodríguez-Mendoza, M. N. (1993). *Manual de agromicrobiología*. Trillas.
- Flores, J., & Jurado, E. (1998). Germination and early growth traits of 14 plants species native to northern Mexico. *Southwestern Naturalist*, 43(1), 40–46. <http://www.jstor.org/stable/30055330>
- García-Sánchez, R., & López-Hernández, A. (2024). Germoplasma de leguminosas para la restauración ecológica del Valle de Mezquital, Hidalgo, México. In A. Monroy-Ata, & S. Castillo-Agüero (Eds.), *Restauración ecológica: proyectos, estudios de caso y prospectivas* (pp. 21–40). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández-Martínez, M., Cetina-Alcalá, V. M., González-Chávez, M. C., & Cervantes-Martínez, C. T. (2006). Inoculación micorrízica y su efecto en el crecimiento de dos leguminosas arbóreas. *Terra Latinoamericana*, 24(1), 65–73. <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1531>
- Herrera-Valencia, W., Barbosa-Sampaio, P. T., & Gomes-de Souza, L. A. (2010). Crecimiento inicial de palo de rosa (*Aniba roseodora* Duke) en distintos ambientes de



- fertilidad. *Acta Amazonica*, 40(4), 693–698. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672010000400008>
- Hsiao, T. C., Acevedo, E., Fereres, E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress, growth and osmotic adjustment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B*, 273, 479–500. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0026>
- Katerji, N., & Mastrorilli, M. (2014). *Water use efficiency of cultivated crops*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0025268>
- Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014). A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.003>
- López-Avendaño, J. E., Díaz-Valdés, T., Watts-Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos-Villegas, A. E., Partida-Ruvalcaba, L., & Velázquez-Alcaraz, T. D. J. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209–219. <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/60>
- López-Camacho, R., González, R., & Cano, M. (2012). *Acacia farnesiana* (L.) Willd. (Fabaceae: Leguminosae), una especie exótica con potencial invasivo en los bosques secos de la isla de Providencia (Colombia). *Biota Colombiana*, 13(2), 232–246. <https://www.redalyc.org/pdf/491/49125845004.pdf>
- López-Gómez, B. F., Alarcón, A., Quintero-Lizaola, R., & Lara-Herrera, A. (2015). Selección de cepas de hongos micorrízicos arbusculares en dos sistemas de producción de chile. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(6), 1203–1214. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.567>
- Lutzoni, F., Nowak, M. D., Alfaro, M. E., Reeb, V., Miadlikowska, J., Krug, M., Arnold, A. E., Lewis, L. A., Swofford, D. L., Hibbett, D., Hilu, K., James, T. Y., Quandt, D., & Magallón, S. (2018). Contemporaneous radiations of fungi and plants linked to symbiosis. *Nature Communications*, 9, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07849-9>



- Medrano-Gil, H., Bota-Salort, J., Cifre-Llompart, J., Flexas-Sans, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías-León, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, 43, 63–84. <https://doi.org/10.14198/INGEO2007.43.04>
- Montaño, N. M., Alarcón, A., Camargo-Ricalde, S. L., Hernández-Cuevas, L. V., Álvarez-Sánchez, J., González-Chávez, M. A., Gavito, M. E., Sánchez-Gallen, I., Ramos-Zapata, J., Guadarrama, P., Maldonado-Mendoza, I. E., Castillo-Argüero, S., García-Sánchez, R., Trejo, D., & Ferrera-Cerrato, R. (2012). Research on arbuscular mycorrhizae in Mexico: an historical synthesis and future prospects. *Symbiosis*, 57, 111–126. <https://doi.org/10.1007/s13199-012-0184-0>
- Moura, J., & Vieira, E. A. (2020). Responses of young plants of *Vachellia farnesiana* to drought. *Australian Journal of Botany*, 68(8), 587–594. <https://doi.org/10.1071/BT20043>
- Muñoz-Iniestra, D. J., Soler-Aburto, A., López-Galindo, F., & Hernández-Moreno, M. M. (2013). *Edafología, manual de métodos de análisis de suelos*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ohms, R. E. (1957). A flotation method for collecting spores of a phycomycetous mycorrhizal parasite from soil. *Phytopathology*, 47, 751–752.
- Palacios-Romero, A., Rodríguez-Laguna, R., Hernández-Flores, M. L., Jiménez-Muñoz, E., & Tirado-Torres, D. (2016). Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 35–46. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000200035
- Parrotta, J. A. (1992). *Acacia farnesiana* (L.) Willd. *Aroma, huisache*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)



- Plascencia-Escalante, F. O., Vargas-Hernández, J. J., Ferrera-Cerrato, R., & González-Hernández, V. A. (1997). Efecto de la micorriza vesículo-arbuscular sobre el crecimiento y distribución de biomasa de plántulas de eucalipto. *Terra Latinoamericana*, 15(1), 7–14. <https://terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/es/issue/view/136/82>
- Ruiz-Lozano, J. M. (2003). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies. *Mycorrhiza*, 13, 309–317. <https://doi.org/10.1007/s00572-003-0237-6>
- Sangabriel-Conde, W., Trejo-Aguilar, D., Soto-Estrada, A., Ferrera-Cerrato, R., & Lara-Capistrán, L. (2010). Potencial de colonización de hongos micorrícico-arbusculares en suelos cultivados con papayo bajo diferentes manejos de producción. *Revista Mexicana de Micología*, 31, 45–52. <https://scientiafungorum.org.mx/index.php/micologia/article/view/1061>
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148(3668), 339–346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- Sieverding, E. (1983). *Técnicas para la separación de esporas del suelo. Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular en el laboratorio*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). <https://hdl.handle.net/10568/54137>
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis: Arbuscular mycorrhizas*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-370526-6.X5001-6>
- Smith, S. E., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 227–250. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103846>
- Tarango-Arámbula, L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17–21. https://revistas.chapingo.mx/zonas_aridas/?section=articles&subsec=issues&numero=91&articulo=938



- Varela, L., Hernández-Cuevas, L. V., Chimal-Sánchez, E., & Montaña, N. M. (2019). Diversidad taxonómica de hongos micorrizógenos arbusculares citados en México. In F. Álvarez-Sánchez, P. Rodríguez-Guzmán, & A. Alarcón (Eds.), *Biodiversidad de microorganismos de México. Importancia, aplicación y conservación*. Universidad Nacional Autónoma de México. Prensas de Ciencias.
- Wang, G., George, T. S., Pan, Q., Feng, G., & Zhang, L. (2022). Two isolates of *Rhizophagus irregularis* select different strategies for improving plants phosphorus uptake at moderate soil P availability. *Geoderma*, 421, 115910. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115910>
- Wen, Y., Xu, T., Chang, W., Li, K., Fan, X., Ping, Y., & Song, F. (2025). The synergistic effect of *Rhizophagus irregularis* and Biochar on the growth of Switchgrass under sodium-saline-alkali stress: insights from soil mechanical property analysis. *Mycorrhiza*, 35(2), 15. <https://doi.org/10.1007/s00572-025-01192-w>
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., & Chen, S. (2021). Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 7(3), 50. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>