

## Influencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Vermicompost en el Crecimiento de Limón Mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) Influence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Vermicompost on the Growth of Mexican Lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle)

Javier Pérez-Inocencio<sup>1†</sup>, Dioselina Álvarez-Bernal<sup>2</sup>, Marcos Alfonso Lastiri-Hernández<sup>3</sup>, Pedro Sandoval-Estrada<sup>3</sup> y Cruz Ernesto Aguilar-Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Jiquilpan. Av. Carretera Nacional s/n km 202, Colonia Centro. 59514. Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México; (J.P.I.).

<sup>†</sup> Autor para correspondencia: javier.pi@jiquilpan.tecnm.mx

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán (CIIDIR-Michoacán). Justo Sierra 28, Colonia Centro. 59510. Jiquilpan, Michoacán, México; (D.A.B.).

<sup>3</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes. Carretera Los Reyes-Jacona km 3, Colonia Libertad. 60330 Los Reyes, Michoacán, México; (M.A.L.H.), (P.S.E.), (C.E.A.R.).

### RESUMEN

La producción de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle), está limitada por el uso intensivo de fertilizantes químicos. En busca de alternativas sostenibles y eficientes, este estudio evaluó la aplicación de vermicompost y hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el crecimiento de plántulas de limón. La evaluación se llevó a cabo comparando la fertilización química (F), vermicompost (V), HMA *Glomus clarum* (G), HMA consorcio (C), combinación de vermicompost + HMA (GV y GVC) y testigo (S). La altura de la planta, diámetro de tallo, número de hojas, área foliar, peso fresco y seco de hojas y raíces, concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Zn en tejidos vegetales, clorofilas, tasa fotosintética, conductancia estomática, número de esporas y colonización micorrízica, fueron evaluadas después de 270 días. Los resultados revelaron un efecto sinérgico significativo ( $P \leq 0.05$ ) entre la aplicación de vermicompost y la inoculación de HMA. Las plantas tratadas con vermicompost promovieron 50% más al número de hojas respecto a testigo y 17% respecto a fertilización química; además, mejoró la biomasa fresca (57% a S y 17% a F). La aplicación de *Glomus clarum* y consorcio, promovieron mayor contenido de N, P y Cu en tejido foliar, así como mayor tasa fotosintética. Los tratamientos combinados de vermicompost y HMA promovieron significativamente mayor altura de planta (56 y 43% de GV respecto a S y F), mejoraron el peso fresco de raíz (59 y 33%), peso seco de hoja y raíz (48-67, 7-31%, respectivamente), aumentaron los niveles de N (45, 29%), P (38, 34%) y Zn (143, 206%) en tejido foliar; así como mayor contenido de clorofila a (9, 6.5%) y clorofila total (12.5, 10%) respecto al testigo y fertilización química. Estos resultados sugieren que la combinación de vermicompost y HMA representan una estrategia prometedora para optimizar la producción sostenible de limón mexicano.

**Palabras clave:** biofertilizante, *Glomus clarum*, enmienda, consorcio.

### SUMMARY

Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle) production is limited by the intensive use of chemical fertilizers. In search of sustainable and efficient alternatives, in our study we evaluated the application of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth of lime seedlings. The evaluation compared chemical fertilization (C), vermicompost (V), *Glomus clarum* AMF (G), an AMF consortium (C), a combination of vermicompost + AMF (GV and GVC), and a control (S). Plant height,



#### Cita recomendada:

Pérez-Inocencio, J., Álvarez-Bernal, D., Lastiri-Hernández, M. A., Sandoval-Estrada, P., & Aguilar-Rodríguez, C. E. (2151). Influencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Vermicompost en el Crecimiento de Limón Mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle). *Terra Latinoamericana*, 43, 1-11. e2151. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2151>

Recibido: 31 de octubre de 2024.

Aceptado: 6 de febrero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Junio de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Luis Hernández Adame

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez



**Copyright:** © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

stem diameter, leaf number, leaf area, fresh and dry weight of leaves and roots, concentrations of N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, and Zn in plant tissues, chlorophyll content, photosynthetic rate, stomatal conductance, spore count, and mycorrhizal colonization were evaluated after 270 days. The results revealed a significant synergistic effect ( $P \leq 0.05$ ) between vermicompost application and AMF inoculation. Vermicompost-treated plants showed a 50% increase in leaf number compared to the control and a 17% increase compared to chemical fertilization; fresh biomass also improved (57 over S and 17% over F). Application of *Glomus clarum* and the AMF consortium promoted higher N, P, and Cu contents in leaf tissue, as well as a higher photosynthetic rate. Combined vermicompost and AMF treatments significantly improved plant height (56 and 43% for GV compared to S and F, respectively), root fresh weight (59 and 33%), leaf and root dry weight (48-67, 7-31%, respectively), and increased leaf tissue levels of N (45, 29%), P (38, 34%), and Zn (143, 206%); as well as higher chlorophyll a (9, 6.5%) and total chlorophyll (12.5, 10%) contents compared to the control and chemical fertilization. Our findings suggest that the combination of vermicompost and AMF represents a promising strategy for optimizing sustainable Mexican lime production.

**Index words:** biofertilizer, *Glomus clarum*, amendment, consortium.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) representa una actividad económica de gran relevancia a nivel mundial. México se posiciona como el segundo mayor productor a escala global de limas y limones, contribuyendo con 3 249 216 toneladas en 210 735 ha para 2023 (FAOSTAT, 2024), de las cuales, 99 350 ha corresponden a limón mexicano (SIAP, 2024). El estado de Michoacán destaca como el principal productor nacional de limón mexicano con 60 159 ha sembradas, concentrando el 64% de la producción nacional, con ingresos superiores a los 11.33 mil millones de pesos en 2023 (SIAP, 2024). La productividad de este cultivo está ligado al uso de fertilizantes químicos; sin embargo, esta práctica, aunque incrementa los rendimientos a corto plazo, conlleva una serie de consecuencias negativas, como el aumento de los costos de producción (Van der Bom *et al.*, 2018) y la degradación de los ecosistemas debido a la contaminación de suelos y aguas (Williams, Börjesson y Hedlund, 2013).

Esta situación ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficientes para la fertilización de este cultivo. Entre estas, los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y el vermicompost han emergido como opciones prometedoras para mejorar la calidad del suelo y nutrición de las plantas (Zeighami Nejad, Ghasemi, Shamili y Damizadeh, 2020). Los HMA establecen una relación simbiótica con las raíces de la mayoría de las plantas, facilitando la absorción de nutrientes no móviles como fósforo, zinc y cobre (Yang, Imran y Ortas, 2023), mejorando la actividad biológica del suelo y sus propiedades fisicoquímicas. (Ebbisa, 2022) Por su parte, el vermicompost, producto de la digestión de materia orgánica por lombrices, aumenta la actividad microbiana, incrementa la disponibilidad de nutrientes, mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo, incrementando la nutrición y productividad de los cultivos (Abioye *et al.*, 2024).

La aplicación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y vermicompost han demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar el crecimiento y desarrollo de diversas especies vegetales, incluyendo tomate (Cheraghi, Motesharezadeh, Alikhani y Mousavi, 2023), zanahoria (Ahamad *et al.*, 2023), maíz (Guarderas-Cabrera, 2021<sup>1</sup>), maní (Sánchez-Roque, Pérez, Santos y Gutiérrez, 2022), alfalfa (Akhzari, Attaeian, Arami, Mahmoodi y Aslani, 2015), nopal (Lahbouki, Ben, Outzourhit y Meddich, 2023), lechuga (Liu, Zhu y Wang, 2020), soja (Alkobaisy, Lafi y Ghani, 2020), pistacho (Paymaneh, Sarcheshmehpour, Mohammadi y Askari, 2023) y cacao (Padjung, Saad, Bahrun y Ridwan, 2019).

En el caso de los cítricos, estudios previos han evaluado individualmente los efectos de biofertilizantes y vermicompost en cultivos como limón, mandarina y pomelo (Fayaz, Patil, Swamy, Shankarappa y Premelatha, 2020; Jain, Meena y Bhatnagar, 2012; Miranda, Mello y Kupper, 2018; Pawar, Garande y Bhide, 2020; Zeighami *et al.*, 2020); los resultados que los tratamientos mejoraron las propiedades del suelo y en el contenido nutricional

<sup>1</sup> Guarderas-Cabrera, D. F. (2021). *Evaluación del efecto de la aplicación de vermicompost enriquecido con bacterias promotoras del crecimiento vegetal y hongos micorrízicos en el desarrollo del maíz Zea mays*. Tesis para obtener el grado de Licenciado, Universidad Técnica Particular de Loja. Disponible en: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/28222>

de los frutos. Sin embargo, los trabajos que evalúan la combinación de HMA y vermicompost en cítricos son aún limitados. Jain, Meena y Bhatnagar (2012) y Zeighami *et al.* (2020) reportaron resultados positivos al aplicar esta combinación en mandarina y limón mexicano, respectivamente. Estos avances preliminares sugieren que la combinación de HMA y vermicompost puede ser una estrategia prometedora para mejorar la sostenibilidad y productividad de los cultivos cítricos. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para evaluar el impacto de esta práctica en diferentes condiciones edafoclimáticas y variedades de cítrico.

Considerando los beneficios reportados de la aplicación de vermicompost y HMA en diversos cultivos, se planteó como hipótesis de esta investigación que la combinación de ambos insumos mejorará significativamente el crecimiento y desarrollo de plántulas de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle). Con el propósito de promover prácticas agrícolas más sostenibles en la producción de limón mexicano, este estudio evaluó el impacto de la aplicación combinada de vermicompost y HMA en el crecimiento y desarrollo de plántulas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio Experimental

Esta investigación se llevó a cabo en el invernadero del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR-IPN) en Jiquilpan, Michoacán, México.

### Material Vegetal y Suelo Empleado

Se utilizaron plántulas de limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) de 5 meses de edad, las cuales fueron injertadas en *Citrus macrophylla* de diez meses de edad y libres de enfermedades. Estas plántulas fueron obtenidas de un vivero certificado ubicado en el municipio de Tecmán, Colima. Sesenta días después del injerto, las plántulas fueron trasplantadas en bolsas de polietileno, llenas con 15 kg de suelo vertisol de la Cuenca de Chapala (19° 34' 27" y 20° 16' 37" N; 102° 43' 16", 102° 32' 53" O) en Michoacán, México. Las características del suelo empleado fueron: textura arcillosa, densidad aparente 1.21 g cm<sup>-3</sup>, capacidad de campo 40%, punto de marchitez permanente 16%, agua aprovechable 24%, pH 6.0, 3.6% materia orgánica (MO), 0.4 dS m<sup>-1</sup> de conductividad eléctrica (CE), 45 meq kg<sup>-1</sup> de capacidad de intercambio catiónico (CIC), 5.45% humedad, 1.06 mg kg<sup>-1</sup> de nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), 18.43 1.06 mg kg<sup>-1</sup> nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), 70.4 mg kg<sup>-1</sup> amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), 56.8 mg kg<sup>-1</sup> fósforo (P) y 1.4 mg kg<sup>-1</sup> potasio (K<sup>+</sup>).

### Vermicompost e Inóculo de HMA

Se utilizó vermicompost elaborado a partir de estiércol bovino con *Eisenia foetida* durante tres meses siguiendo la metodología de Álvarez-Bernal, Lastiri, Buelna, Contreras y Mora (2016). Las características del vermicompost fueron: pH 8.9, 1.55 dS m<sup>-1</sup> de CE, 32.9% humedad, 47% MO, 5.38 mg kg<sup>-1</sup> de NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, 686.5 mg kg<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 70.4 mg kg<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 199 mg kg<sup>-1</sup> P, 4.5 mg kg<sup>-1</sup> Fe, 10 mg kg<sup>-1</sup> Zn, 0.87 mg kg<sup>-1</sup> Cu.

El inóculo de HMA contenía únicamente *Glomus clarum*. El consorcio de HMA incluía *G. aggregatum*, *G. deserticola*, *G. geosporum*, *G. microaggregatum*, *Sclerocystis coremioides*, *S. sinuosum*, *Gigaspora margarita*, *Scutellospora callosporay* y *S. gregaria*, crecidas en planta huésped *Sorgum vulgare*, obtenidos de la colección de Cinvestav-Irapuato (México).

### Diseño Experimental

El experimento se dispuso en un diseño completo al azar con siete tratamientos y diez repeticiones. Los tratamientos fueron: suelo sin enmiendas (S, testigo); suelo + fertilización convencional, es un fertilizante comercial triple 17<sup>®</sup> utilizado para cítricos (considerado el tratamiento F); suelo + *G. clarum* (considerado el tratamiento G); suelo + consorcio HMA (considerado el tratamiento C); suelo + vermicompost (considerado tratamiento V); suelo + vermicompost + *G. clarum* (considerado el tratamiento GV); y suelo + vermicompost + consorcio HMA (considerado el tratamiento GVC).

Las plántulas de limón injertado se trasplantaron en el 15 de febrero del 2022, en bolsas de polietileno de 15 kg de forma individual, previamente llenadas con el suelo y enmendadas según el tratamiento asignado. La aplicación de fertilizante convencional y vermicompost se ajustó para suministrar 5.1 g de nitrógeno total por planta por ciclo anual, siguiendo las recomendaciones de Legaz y Primo-Millo (1998) para cítricos, realizada en dos aplicaciones, la primera aplicación al inicio del experimento y la segunda a los 120 días después del trasplante. El inóculo de HMA o consorcio, fue de 50 g por planta (50 esporas g<sup>-1</sup>), se aplicó alrededor de la zona radicular en el trasplante.

Las plantas se mantuvieron en invernadero durante 270 días bajo condiciones ambientales controladas (temperatura medio día/noche de 30/19 °C y humedad relativa del 70-90%). Se realizó un riego semanal hasta capacidad de campo del suelo.

## **Variables Medidas**

### **Variables Biométricas**

Las variables de crecimiento (altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas) se evaluaron a los 90, 180 y 270 días después del trasplante, determinando el incremento inducido por los tratamientos respecto a los valores de cada variable al inicio del experimento (tomando como cero los valores al comienzo del experimento). Al final del experimento, se determinó el área foliar (mediante el software Image J (Schneider, Rasband y Eliceiri, 2024)), el volumen de raíces por el método de Harrington *et al.* (1994), y el peso fresco de hojas y raíces.

### **Contenido Nutricional en Tejido Vegetal**

El material vegetal (hojas y raíces) se secó a estufa a  $75 \pm 2$  °C durante 48 h hasta peso constante para determinar el peso seco, posteriormente se molió y se almacenó hasta análisis. Para determinar la concentración de minerales, se digirieron 0.1 g de material vegetal (hojas y raíces) ( $n=3$ ) con una mezcla de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno, siguiendo el protocolo descrito por Jones Jr y Case (1990). El contenido de fósforo en tejido foliar y raíz se cuantificó espectrofotométricamente a 466 nm utilizando un equipo Perkin Elmer®. El nitrógeno en tejido foliar se determinó mediante el método de micro-Kjeldahl. Los contenidos de magnesio, potasio, calcio, hierro, cobre y zinc en tejido foliar se cuantificaron mediante espectrometría de absorción atómica de llama, siguiendo los procedimientos estándar de Jones Jr y Case (1990).

### **Tasa Fotosintética, Conductancia Estomática y Contenido de Clorofila**

Al finalizar el experimento, se determinaron la tasa fotosintética y conductancia estomática utilizando un equipo LI-6200 (LI-COR, INC), esto en la cuarta hoja completamente expandida de cada planta. Las mediciones se realizaron en un lapso de tiempo de 9:30 a 11:00 am, después de alcanzar la estabilidad del equipo. Para cuantificar el contenido de clorofila, se seleccionaron de la parte media de la planta, considerando de que en esta área hay mayor representación de un estado fisiológico más estable, se extrajeron 0.5 g de tejido foliar fresco y se maceraron con 5 ml de acetona al 80% (v/v), se midió la absorbancia a 644 y 662 nm en un espectrofotómetro UV-VIS VIS (Perkin Elmer®), se calcularon, por fórmula, la concentración de clorofila total (Ferreira, do Nascimento, da Silva-Souza, da Silveira y Shibata, 2018).

### **Variables Micorrízicas**

Se evaluó la colonización micorrízica arbuscular (HMA) en raíces frescas siguiendo la metodología descrita por Phillips y Hayman (1970). Las raíces se lavaron exhaustivamente con agua desionizada, se fragmentaron en segmentos de 1 cm y se sometieron a una serie de aclaramientos sucesivos con KOH al 10 y HCl al 10%. Posteriormente, se tiñeron con azul de tripano al 0.05% para facilitar la visualización de las estructuras fúngicas. La colonización micorrízica se cuantificó mediante observación microscópica en un microscopio de campo claro (Karl Zeiss, 40X), para ello, se empleó la técnica de intersección de líneas en una cámara de Neubauer, lo que permitió estimar el porcentaje de longitud de raíz colonizada por hifas, vesículas y arbuscúlos (contabilizados de forma independiente). A la par, se determinó la densidad de esporas de hongos micorrízicos en suelo. Una alícuota de 50 g de suelo se tamizó a través de malla de 5 mm para homogeneizar la muestra. El conteo de esporas se realizó siguiendo el método descrito por Gerdemann y Nicolson (1963), el cual consistió en la separación de las esporas mediante flotación en una solución de sacarosa, seguida de su conteo en una cámara de Neubauer.

### **Análisis Estadístico**

Se evaluaron los efectos de los tratamientos y el tiempo de crecimiento sobre la altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas mediante un análisis de varianza de dos vías (ANOVA) utilizando el procedimiento GLM del software SAS (SAS Institute, 2017). Para comparar las medias de los tratamientos y determinar las

diferencias significativas, se aplicó la prueba de rango múltiple de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Adicionalmente, se realizaron análisis de varianza unidireccional para evaluar los efectos de los tratamientos sobre las siguientes variables: tasa fotosintética, conductancia estomática, tasa de transpiración, área foliar, volumen de raíces, peso fresco y seco de hojas y raíces, contenido de clorofila, concentración de fósforo en hojas y raíces, porcentaje de colonización micorrízica arbuscular (HMA) en raíces, densidad de esporas de HMA en el suelo y contenido de nutrientes en tejido foliar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evolución Temporal de Numero de Hojas, Altura de Planta y Diámetro de Tallo

En la Figura 1, se ilustran la evolución temporal del incremento inducido en las variables de número de hojas, altura de planta y diámetro de tallo en respuesta a los diferentes tratamientos.

En la figura 1a, se aprecia que en la primera medición (90 días), el tratamiento con *Glomus clarum* (G) indujo un incremento significativo del 29% en el número de hojas en comparación con el testigo (S) y del 12% al tratamiento con fertilización química (F). Este efecto se mantuvo y amplió a lo largo del experimento, con los tratamientos que incluyeron vermicompost mostraron incrementos significativos en la última medición (270 días) respecto al testigo y a la fertilización química; el tratamiento V incrementó en 50% al testigo y 17% a la fertilización química, mientras que GV incrementó 40% respecto al tratamiento S y 9% respecto al tratamiento F; mientras que el tratamiento GVC incremento en 45% respecto al tratamiento S y 13% respecto al tratamiento F.

Si bien, no se observaron diferencias significativas en la altura de planta en las primeras mediciones (Figura 1b), el tratamiento GV presentó un aumento del 56% respecto al testigo y 43% respecto a la fertilización convencional, esto en la evaluación final (270 días). Los demás tratamientos presentaron alturas similares al tratamiento con fertilización química.

Para el diámetro de tallo (Figura 1c), en la primera medición no se observan diferencias estadísticas significativa entre los tratamientos. En la segunda medición (180 días), el tratamiento G mostró un aumento significativo del 13% en el diámetro de tallo respecto a al tratamiento S y al tratamiento F, indicando un mayor desarrollo estructural en respuesta a la micorrización.

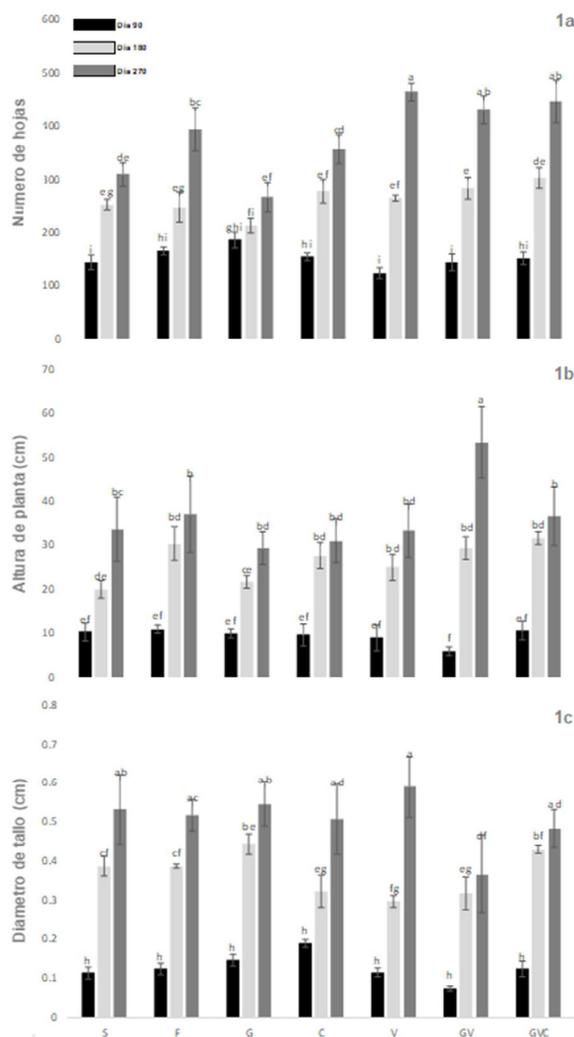
Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de *Glomus clarum* y vermicompost, tanto de manera individual como en combinación, tuvo un efecto positivo y significativo en el crecimiento vegetativo de las plantas, especialmente en términos de número de hojas. Estos hallazgos resaltan la importancia de las micorrizas arbusculares y los fertilizantes orgánicos en la promoción del desarrollo vegetal, superando en algunos casos los efectos de la fertilización química convencional.

### Variables Biométricas

Los resultados presentados en el Cuadro 1, revelan diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Respecto al peso fresco de hojas, el tratamiento con vermicompost (V) mostró un incremento del 57% en el peso fresco de hojas en comparación con el testigo y 17% respecto a fertilización química, alcanzando un valor promedio de  $150.3 \pm 3.5$  g. Por su parte, el tratamiento combinado de vermicompost y consorcio HMA (GVC) presentó el mayor peso fresco de raíces ( $189.3 \pm 12.4$  g), siendo 59% mayor respecto al testigo y 33% a fertilización química. En cuanto al peso seco de hojas, tanto el tratamiento V como el GVC mostraron valores significativamente mayores en hojas ( $46.62 \pm 2.25$  g y  $44.52 \pm 5.38$  g, respectivamente) esto respecto al testigo y fertilización química. Asimismo, el tratamiento GVC presentó el mayor peso seco de raíces, con un incremento del 67 y 31% respecto al testigo y fertilización química. El área foliar mostró un aumento significativo en el tratamiento con vermicompost (V), alcanzando un valor promedio de  $5107.4 \pm 1.0$  centímetros cuadrados.

### Contenido Nutricional en Tejido Vegetal

Los análisis de contenido nutricional en tejidos foliares y radicales revelaron un aumento significativo de los tratamientos de inoculación micorrízica y fertilización orgánica (Cuadro 1). En cuanto al fósforo (P), la inoculación con *Glomus clarum* (G) como la aplicación de vermicompost (V) promovieron un incremento notable en la concentración de este nutriente, especialmente en raíces, donde se observó un aumento que va del 93 al



**Figura 1. Efecto de HMA y vermicompost sobre las variables de crecimiento de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) en diferentes tiempos.** Las gráficas muestran los incrementos en cada variable a 90, 180 y 270, tomando como valor cero las mediciones al inicio del experimento. 1a) número de hojas, 1b) altura de la planta y 1c) diámetro del tallo de plantas, a diferentes tratamientos: S, suelo; F, suelo + fertilización convencional; G, suelo + *Glomus clarum*; C, suelo + consorcio HMA; V, suelo + vermicompost; GV, suelo + vermicompost + *Glomus clarum*; y GVC, suelo + vermicompost + consorcio HMA ( $n = 10 \pm se$ ). Letras diferentes indican diferencias significativas entre el día de muestreo y los tratamientos ( $P \leq 0.05$ ).

**Figure 1. Effect of AMF and vermicompost on Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle) growth variables at different time points.** The graphs illustrate the incremental changes in each variable at 90, 180, and 270 days, with initial measurements at the start of the experiment serving as a baseline. 1a) Number of leaves, 1b) plant height, and 1c) stem diameter of the plants, under different treatments: S, soil; F, soil + conventional fertilization; G, soil + *Glomus clarum*; C, soil + AMF consortium; V, soil + vermicompost; GV, soil + vermicompost + *Glomus clarum*; and GVC, soil + vermicompost + AMF consortium ( $n = 10 \pm se$ ). Different letters indicate significant differences between sampling days and treatments ( $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro 1. Efecto de la inoculación de hongos micorrízicos y adición de vermicompost sobre las variables biométricas y nutricionales en limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle).****Table 1. Effect of mycorrhizal fungi inoculation and vermicompost addition on biometric and nutritional variables in Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Swingle).**

Variables	Tratamientos						
	S	F	G	C	V	GV	GVC
Peso fresco hojas (g)	96.00±2.00 c	128.00±7.00 ab	65.70±12.00 d	95.00±2.00 c	150.30±3.50 a	113.30±9.20 bc	130.50±16.50 ab
Peso fresco raíz (g)	119.00±2.00 c	142.00±2.00 bc	158.00±15.00 ab	125.30±10.70 bc	150.50±20.00 bc	123.00±4.00 bc	189.30±12.40 a
Peso seco hojas (g)	30.02±3.70 cd	41.67±1.25 ab	21.59±3.15 d	34.84±3.80 bc	46.62±2.25 a	38.00±2.13 abc	44.52±5.38 a
Peso seco raíz (g)	28.87±2.72 b	36.53±2.42 b	38.64±1.00 ab	38.04±1.00 ab	37.53±1.20 ab	37.13±9.00 ab	47.86±1.50 a
Área folia (cm <sup>2</sup> )	2848.30±55.31 cd	4042.80±490.00 b	2152.90±372.00 d	3148.10±53.00 c	5107.40±1.00 a	3497.00±290.00 bc	4316.50±427.00 ab
P en hojas (g kg <sup>-1</sup> )	1.46±0.46 c	1.51±0.14 bc	1.93±0.28 ab	1.49±0.09 bc	2.16±0.21 a	2.02±0.01 a	1.38±0.15 c
P raíz (g kg <sup>-1</sup> )	1.58±0.02 c	1.65±0.24 c	3.19±0.15 a	2.09±0.17 bc	3.31±0.42 a	2.29±0.10 bc	1.91±0.22 bc
N total (g kg <sup>-1</sup> )	14.44±0.86 bc	16.17±0.85 bc	11.67±0.79 d	13.86±0.91 c	21.92±0.07 a	20.90±0.19 a	20.93±0.30 a
K (g kg <sup>-1</sup> )	19.50±0.87 a	19.30±0.58 a	23.70±1.26 a	23.30±0.29 a	21.80±3.33 a	20.00±2.18 a	21.00±1.32 a
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	30.18±0.06 a	27.34±1.07 b	25.50±0.38 b	25.21±1.58 b	16.44±0.81 c	25.13±0.25 b	26.94±0.69 b
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	2.12±0.02 ab	2.29±2.50 a	2.07±0.06 ab	2.09±0.08 ab	1.83±0.14 b	2.04±0.08 ab	1.96±0.26 ab
Mn (g kg <sup>-1</sup> )	45.00±5.00 ab	42.50±2.50 ab	33.33±2.89 b	50.00±5.00 a	35.05±8.60 ab	36.67±7.64 ab	40.10±5.00 ab
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	130.01±5.00 a	112.67±2.52 bc	131.66±7.64 a	136.35±5.00 a	102.63±2.52 c	106.70±7.60 bc	121.47±2.90 ab
Cu (g kg <sup>-1</sup> )	7.51±2.50 bc	15.35±5.00 bc	27.60±2.50 a	5.16±1.15 c	6.67±2.90 c	6.03±2.10 c	10.46±1.20 bc
Zn (g kg <sup>-1</sup> )	63.00±12.50 b	50.00±5.00 bc	51.00±5.00 bc	28.00±2.50 d	38.00±2.50 cd	23.00±2.50 d	153.00±2.50 a

Las medias con la misma letra dentro de cada fila no son significativamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ) ( $n = 10$ ). S, suelo; F, suelo + fertilización convencional; G, suelo + *Glomus clarum*; C, suelo + consorcio HMA; V, suelo + vermicompost; GV, suelo + vermicompost + *Glomus clarum* y GVC, suelo + vermicompost + consorcio HMA ( $n = 10 \pm se$ ). P = fósforo; N = nitrógeno; K = potasio; Ca = calcio; Mg = magnesio; Mn = manganeso; Fe = hierro; Cu = cobre; Zn = zinc.

Means with the same letter within each row are not significantly different ( $P \leq 0.05$ ) ( $n = 10$ ). S, soil; F, soil + conventional fertilization; G, soil + *Glomus clarum*; C, soil + AMF consortium; V, soil + vermicompost; GV, soil + vermicompost + *Glomus clarum*; and GVC, soil + vermicompost + AMF consortium ( $n = 10 \pm SE$ ). P = phosphorus; N = nitrogen; K = potassium; Ca = calcium; Mg = magnesium; Mn = manganese; Fe = iron; Cu = copper; Zn = zinc

109% respecto al testigo y fertilización química. De manera similar, en tejidos foliares, los tratamientos G, V y GV (combinación de ambos) presentaron concentraciones de P significativamente superiores al testigo. Respecto a otros micronutrientes, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos. El tratamiento G destacó en el contenido de cobre (Cu), mientras que el tratamiento C (fertilización convencional) mostró mayor concentración de manganeso (Mn). El vermicompost (V) y los tratamientos combinados (GV y GVC) promovieron un incremento significativo en el contenido de nitrógeno (N) y zinc (Zn), especialmente el tratamiento GVC. Estos resultados evidencian la capacidad de los HMA y del vermicompost para mejorar la nutrición mineral de las plantas de limón, especialmente en lo referente al fósforo, nitrógeno, zinc y cobre. La sinergia entre ambos tratamientos, observada en el tratamiento GVC, sugiere un efecto complementario en la absorción y translocación de nutrientes, considerando esta alternativa viable para la sustitución de la fertilización química.

## Tasa Fotosintética, Conductancia Estomática y Contenido de Clorofila

Los resultados de las mediciones fisiológicas, presentados en la Cuadro 2, revelan diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) entre los tratamientos en cuanto a tasa fotosintética, conductancia estomática y clorofilas. La tasa fotosintética y la conductancia estomática mostraron los mayores incrementos en los tratamientos con inoculación de *Glomus clarum* (G) y el consorcio (C), el tratamiento G presentó 32% mayor tasa fotosintética respecto a S y 45% respecto a F; mientras que el tratamiento C aumentó significativamente la conductancia estomática de la planta en un 11% respecto a S y 9% respecto a F. Sin embargo, es importante destacar que no todos los tratamientos presentaron diferencias significativas respecto al testigo y fertilización química. En la concentración de clorofilas, por su parte, experimentó mayor concentración de clorofila a y clorofila total ( $0.49 \pm 0.03 \text{ mg g}^{-1}$  y  $0.99 \pm 0.02 \text{ mg g}^{-1}$  respectivamente) el tratamiento combinado de vermicompost y *Glomus clarum* (GV) en relación al resto de los tratamientos. Estos resultados sugieren una mayor actividad fotosintética en los tratamientos con HMA, lo que indica una mayor eficiencia en la captación de luz y fijación de carbono. Sin embargo, el tratamiento GVC presentó menores valores respecto al resto de los tratamientos, contrastando con el contenido de nitrógeno en la planta.

## Variables Micorrízicas

Los resultados del análisis de esporas en suelo confirmaron la presencia de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en todos los tratamientos, aunque en bajas densidades, lo cual podría atribuirse a que el suelo empleado para el estudio no fue esterilizado, teniendo presencia de poblaciones nativas.

En el Cuadro 3, se muestra el porcentaje de colonización micorrízica total, que varió entre un 76 y un 92% en los tratamientos inoculados con HMA, siendo mayor en el tratamiento con vermicompost (92%). En cuanto a las estructuras fúngicas, se observó un mayor porcentaje de vesículas en el tratamiento GV (81%), mientras que el resto de los tratamientos inoculados con HMA presentaron porcentajes superiores al 50%. El tratamiento con vermicompost mostró el menor porcentaje de vesículas (11.8%). Por otro lado, el tratamiento GVC presentó el mayor porcentaje de arbusculos (46%).

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la sinergia entre la aplicación de vermicompost y la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la promoción del crecimiento y desarrollo de plantas de limón injertado, corroborando hallazgos previos.

### Cuadro 2. Efecto en la tasa fotosintética, conductancia estomática y clorofila en limón mexicano (*Citrus aurantifolia*) por inoculación de hongos micorrízicos y adición de vermicompost.

**Table 2. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and vermicompost application on photosynthetic rate, stomatal conductance, and chlorophyll content in Mexican lime (*Citrus aurantifolia*).**

Tratamientos	Tasas fotosintéticas	Conductancia estomática	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>		
S	5.50±0.8 ab	265±16.9 ab	0.45±0.03 ab	0.47±0.01 a	0.88±0.07 b
F	5.10±1.5 ab	269±56.6 ab	0.46±0.01 ab	0.45±0.01 ab	0.90±0.03 ab
G	7.40±1.3 a	235±31.4 abc	0.40±0.01 c	0.42±0.01 bc	0.82±0.03 bc
C	4.80±1.6 ab	293±41.6 a	0.33±0.01 d	0.41±0.01 c	0.71±0.02 c
V	4.20±1.5 ab	208±70.1 abc	0.47±0.01 ab	0.43±0.01 bc	0.89±0.01 ab
GV	6.70±1.7 ab	169±10.7 bc	0.49±0.03 a	0.48±0.02 a	0.99±0.02 a
GVC	2.90±1.6 b	144±17.2 c	0.42±0.02 bc	0.35±0.02 d	0.72±0.06 c

Las medias con la misma letra dentro de cada columna no son diferentes significativamente ( $P \leq 0.05$ ;  $n = 10$ ). S, suelo; F, suelo + fertilización convencional; G, suelo + *Glomus clarum*; C, suelo + consorcio HMA; V, suelo + vermicompost; GV, suelo + vermicompost + *Glomus clarum* y GVC, suelo + vermicompost + consorcio HMA ( $n = 10 \pm se$ ).

Means with the same letter within each column are not significantly different ( $P \leq 0.05$ ;  $n = 10$ ). S, soil; F, soil + conventional fertilization; G, soil + *Glomus clarum*; C, soil + AMF consortium; V, soil + vermicompost; GV, soil + vermicompost + *Glomus clarum*; and GVC, soil + vermicompost + AMF consortium ( $n = 10 \pm se$ ).

**Cuadro 3. Esporas, colonización de HMA, vesículas y arbusculos en limón mexicano (*Citrus aurantifolia*).**  
**Table 3. Spores, AMF colonization, vesicles, and arbuscules in Mexican lime (*Citrus aurantifolia*).**

Tratamientos	Esporas/50 g suelo	Hifas	Vesículas	Arbusculos
	----- % -----			
S	23.00±2.5 c	47.33±5.5 c	18.52±8.4 c	2.22±3.8 c
F	53.00±2.0 abc	61.11±7.8 bc	47.85±3.3 b	2.22±3.8 c
G	45.50±10.5 bc	86.66±17.6 a	46.07±8.7 b	25.19±13.1 ab
C	61.00±5.0 ab	91.11±2.2 a	48.15±6.8 b	28.89±9.6 ab
V	68.50±25.0 ab	92.22±1.1 a	11.85±8.9 c	14.07±5.6 bc
GV	30.00±3.5 c	73.69±27.3 a	81.11±7.8 a	28.89±4.4 ab
GVC	79.50±9.5 a	76.29±10.0 ab	58.60±7.8 b	45.93±7.8 a

S, suelo; F, suelo + fertilización convencional; G, suelo + *Glomus clarum*; C, suelo + consorcio HMA; V, suelo + vermicompost; GV, suelo + vermicompost + *Glomus clarum* y GVC, suelo + vermicompost + consorcio HMA (n = 10±se).

S, soil; F, soil + conventional fertilization; G, soil + *Glomus clarum*; C, soil + AMF consortium; V, soil + vermicompost; GV, soil + vermicompost + *Glomus clarum*; and GVC, soil + vermicompost + AMF consortium (n = 10±se).

Investigaciones anteriores han demostrado efectos similares. Miranda *et al.* (2018) reportaron un incremento en la altura de planta y diámetro de tallo de diversos portainjertos de cítricos al emplear HMA (*G. clarum* y *G. etunicatum*) y vermicompost como sustrato, además de mejorar la absorción de nutrientes esenciales. Jain, Meena y Bhatnagar (2018) obtuvieron resultados análogos en *Citrus reticulata*, observando un aumento en diversas variables de crecimiento al combinar inoculación micorrízica y vermicompost. Kumar, Arora, Thakur y Sharma (2020) reportaron incrementos significativos en altura, diámetro de tallo, número de hojas y contenido nutricional en *Citrus jambhiri* bajo condiciones similares. Asimismo, Bhagat, Thakur y Dhaliwal (2013) y Ortas y Ustuner (2014) documentaron mejoras en el crecimiento de cítricos al utilizar combinaciones de sustratos enriquecidos con materia orgánica y HMA. Zeighami *et al.* (2020) destacaron el papel de estas prácticas en la mitigación del estrés hídrico en *Citrus aurantifolia*, mejorando diversos parámetros fisiológicos.

La inoculación con HMA y la aplicación de vermicompost tuvieron un impacto positivo en diversos parámetros de crecimiento, como la altura de planta, el diámetro del tallo, el número de hojas y el área foliar. Estos efectos pueden atribuirse a múltiples mecanismos, incluyendo una mayor absorción de nutrientes, especialmente fósforo, gracias a la extensa red de hifas de los HMA que exploran volúmenes de suelo inaccesibles para las raíces de la planta (Ortaş & Rafique, 2017).

La alta colonización micorrízica observada en el tratamiento GVC sugiere una interacción positiva entre el HMA y el vermicompost, lo que podría deberse a una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo enriquecido con materia orgánica, estimulando el crecimiento de las hifas y la formación de estructuras fúngicas. Sin embargo, es importante destacar que la colonización micorrízica no solo depende de la presencia de inóculo, sino también de las condiciones ambientales y de las características de la planta huésped (Tourville, Horton y Dovciak, 2024). La mejora en la tasa fotosintética y la conductancia estomática observada en algunos tratamientos puede estar relacionada con un mayor suministro de nutrientes y una mejor hidratación de las plantas micorrizadas, favoreciendo así la actividad fotosintética (Dai *et al.*, 2022).

Los efectos benéficos del vermicompost sobre el crecimiento vegetal se atribuyen a su capacidad para mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, aumentar la disponibilidad de nutrientes y estimular la actividad microbiana (Thakur *et al.*, 2021; Vuković *et al.*, 2021). La combinación de vermicompost y HMA puede potenciar estos efectos, creando un ambiente de suelo más favorable para el desarrollo de las plantas.

Los resultados de este estudio demuestran que la inoculación con HMA y la aplicación de vermicompost son herramientas prometedoras para mejorar el crecimiento y desarrollo de plantas de limón, a través de mecanismos que incluyen una mayor absorción de nutrientes, una mejor eficiencia en el uso del agua y una mayor actividad fotosintética. Sin embargo, se requieren estudios adicionales para elucidar los mecanismos moleculares y fisiológicos subyacentes a estas interacciones y para evaluar el impacto a largo plazo de estas prácticas en la producción de cítricos.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio revelan que tanto la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares como la adición de vermicompost al suelo, contribuyeron de manera significativa en el crecimiento de plántulas de limón injertado. Se observó un efecto sinérgico cuando se agregaron juntos al cultivo; en tales condiciones mejoró la absorción de nutrientes, hubo mejor respuesta fisiológica y se produjeron otros componentes importantes para la planta. Los resultados tienen potencial para mejorar el manejo agronómico, durante la etapa de crecimiento, de los cítricos en los sistemas de producción. Estas mejoras pueden conducir a una producción agrícola sustentable, al reducir la aplicación de insumos químicos y proporcionar mayores beneficios económicos, ecológicos y para la salud humana, proporcionados por los microorganismos beneficiosos del suelo.

## DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

## CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

Este proyecto fue apoyado por una subvención de la División de Investigación y Posgrado-Instituto Politécnico Nacional, SIP20110048. Así también, por fondos del Instituto Tecnológico Superior de Los Reyes y el Instituto Tecnológico de Jiquilpan, para su publicación.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología e investigación: J.P.I. y D.A.B. Recursos: D.A.B. Curación de datos, análisis de datos: J.P.I, D.A.B. y C.E.A.R. Escritura, preparación del borrador original, revisión y edición: J.P.I., D.A.B., M.A.L.H., C.E.A.R. y P.S.E. Administración del proyecto, adquisición de fondos: D.A.B.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. V. Olalde por proporcionar los HMA y el uso del LI-6200.

## LITERATURA CITADA

- Abioye, O. M., Amodu, M. F., Raphael, D. O., Olasehinde, D. A., Aniobi, M. M., Yusuf, K. O., & Olosho, A. I. (2025). An Overview of the Role of Vermicompost in Reducing Green House Gas Emissions, Improving Soil Health, and Increasing Crop Yields. *Applied Science and Engineering Progress*, 18(2), 7586-7586. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2024.09.011>
- Ahamad, L., Bhat, A. H., Kumar, H., Rana, A., Hasan, M. N., Ahmed, I., ... & Ameen, F. (2023). From soil to plant: strengthening carrot defenses against *Meloidogyne incognita* with vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi biofertilizers. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1206217.
- Akhzari, D., Attaeian, B., Arami, A., Mahmoodi, F., & Aslani, F. (2015). Effects of Vermicompost and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Properties and Growth of *Medicago polymorpha* L. *Compost Science & Utilization*, 23(3), 142-153.
- Alkobaisy, J. S., Lafi, A. S. A., & Ghani, E. T. A. (2020). Influence of using Mycorrhizae (MH) with vermicompost (VRF) on soil properties, soybean (*Glycine max* L.) growth and yield. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 11(6), 347-351.
- Álvarez-Bernal, D., Lastiri Hernández, M. A., Buelna-Osben, H. R., Contreras-Ramos, S. M., & Mora, M. (2016). Vermicompost as an alternative of management for water hyacinth. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(4), 425-433. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.06>

- Bhagat, S., Thakur, A., & Dhaliwal, H. (2013). Organic amendments influence growth, buddability and budding success in rough lemon (*Citrus jambhiri* Lush.). *Biological agriculture & horticulture*, 29(1), 46-57.
- Cheraghi, M., Motesharezadeh, B., Alikhani, H. A., & Mousavi, S. M. (2023). Optimal management of plant nutrition in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) by using biologic, organic and inorganic fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 46(8), 1560-1579.
- Dai, F., Rong, Z. I. Y. I., Wu, Q., Abd-Allah, E. F., Liu, C., & Liu, S. (2022). Mycorrhiza improves plant growth and photosynthetic characteristics of tea plants in response to drought stress. *Biocell*, 46(5), 1339-1346. <https://doi.org/10.32604/biocell.2022.018909>
- Ebbisa, A. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in optimizing nutrient bioavailability and reducing agrochemicals for maintaining sustainable agroecosystems. En R. N. de Sousa (Ed.). *Arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture - New insights* (pp. 1-17). London, United Kingdom: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106995>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). (2024). *Base de datos estadísticos*. Consultada el 28 de abril, 2024, desde <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fayaz, A., Patil, S., Swamy, G., Shankarappa, T., & Premelatha, B. (2020). Pummelo (*Citrus maxima* L) seedlings growth as influenced by bio-fertilizers and organic amendments. *International Journal of Chemical Studies*, 8(5), 2317-2320. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i5af.10649>
- Ferreira, R. O., do Nascimento, M. N., da Silva-Souza, L., da Silveira, F. G. F., & Shibata, R. T. (2018). Comparison of different methods for assessing chlorophyll content in citrus. *Journal of Agricultural Science*, 10(9), 217-217. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n9p217>
- Gerdemann, J., & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235-244.
- Harrington, J. T., Mexal, J. G., & Fisher, J. T. (1994). Volume displacement provides a quick and accurate way to quantify new root production. *Seedling*, 121, 124.
- Jain, M. C., Meena, M., & Bhatnagar, P. (2012). Plant growth characteristic of Nagpur mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) as affected by mycorrhiza and vermicompost during pre-brearing stage. *Progressive Horticulture*, 44(1), 80-83.
- Jones Jr, J. B., & Case, V. W. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil Testing and Plant Analysis*, 3, 389-427.
- Kumar, H., Arora, R., Thakur, A., & Sharma, S. (2020). Impact assessment of growing media and bioinoculents on growth and bud take of rough lemon. *Indian Journal of Horticulture*, 77(3), 439-449. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-0112.2020.00063.8>
- Lahbouki, S., Ben-Laouane, R., Outzourhit, A., & Meddich, A. (2023). The combination of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi improves the physiological properties and chemical composition of *Opuntia ficus-indica* under semi-arid conditions in the field. *Arid Land Research and Management*, 37(2), 284-309.
- Legaz, F., & Primo-Millo, E. (1988). *Normas para la fertilización de los agrios* (2ª Ed.). Valencia, España: Consellería d'Agricultura, Pesca i Alimentació, Generalitat
- Liu, M., Zhu, C., & Wang, C. (2020). Vermicompost assisted arbuscular mycorrhizal fungi to transfer 15N from crop residues to lettuce. *Plant and Soil*, 456(1), 175-187. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04711-0>
- Miranda, P. B., Mello, A. H. D., & Kupper, K. C. (2018). Mycorrhizal dependence of citrus rootstock. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 40(3). <https://doi.org/10.1590/0100-29452018762>
- Ortas, I., & Rafique, M. (2017). The Mechanisms of Nutrient Uptake by Arbuscular Mycorrhizae. En A. Varma, R. Prasad, & N. Tuteja (Eds.). *Mycorrhiza- Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration* (pp. 1-19). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1_1)
- Ortas, I., & Ustuner, O. (2014). Determination of different growth media and various mycorrhizae species on citrus growth and nutrient uptake. *Scientia Horticulturae*, 166, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.014>
- Padjung, R., Saad, S. H., Bahrn, A. H., & Ridwan, I. (2019). Growth and development of *Theobroma cacao* seedlings as a response to different dosages of vermicompost and arbuscular mycorrhizal fungi. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (p. 012017). Bristol, United Kingdom: IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/343/1/012017>
- Pawar, P. S., Garande, V. K., & Bhite, B. R. (2020). Effect of vermicompost and biofertilizers on growth, yield and fruit quality of sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) cv. Mosambi. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 3370-3372. <https://doi.org/10.22271/phyto.2020.v9.i4v.12140>
- Paymaneh, Z., Sarcheshmehpour, M., Mohammadi, H., & Askari-Hesni, M. (2023). Vermicompost and/or compost and arbuscular mycorrhizal fungi are conducive to improving the growth of pistachio seedlings to drought stress. *Applied Soil Ecology*, 182, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104717>
- Phillips, J., & Hayman, D. (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
- Sánchez-Roque, Y., Pérez-Luna, Y. C., Santos-Espinoza, A. M., & Gutiérrez-Miceli, F. A. (2022). Evaluation of the effect of native arbuscular mycorrhizal fungi in vermicompost leachate on the yield and quality of field-grown peanuts. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1612>
- SAS Institute. (2017). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 9.4*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2024). *ImageJ User's Guide*. Bethesda, MD, USA: U.S. National Institutes of Health.
- SIAP (Sistema de Información Agrícola y Pecuaria). (2024). *Cierre de producción agrícola (2023)*. Consultada el 28 de abril, 2024, desde [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/)
- Thakur, A., Kumar, A., Kumar, C. V., Kiran, B. S., Kumar, S., & Athokpam, V. (2021). A review on vermicomposting: By-products and its importance. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 22, 156-164.
- Tourville, J. C., Horton, T. R., & Dovciak, M. (2024). Mycorrhizal fungi as critical biotic filters for tree seedling establishment during species range expansions. *Ecological Monographs*, 94(4), e1634. <https://doi.org/10.1002/ecm.1634>
- Van der Bom, F., Nunes, I., Raymond, N. S., Hansen, V., Bonnichsen, L., Magid, J., ... & Jensen, L. S. (2018). Long-term fertilisation form, level and duration affect the diversity, structure and functioning of soil microbial communities in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 122, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.04.003>
- Vuković, A., Velki, M., Ečimović, S., Vuković, R., Štolfa Čamagajevac, I., & Lončarić, Z. (2021). Vermicomposting-Facts, benefits and knowledge gaps. *Agronomy*, 11(10), 1952. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101952>
- Williams, A., Börjesson, G., & Hedlund, K. (2013). The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 67, 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.08.008>
- Yang, S., Imran, & Ortas, I. (2023). Impact of mycorrhiza on plant nutrition and food security. *Journal of Plant Nutrition*, 46(13), 3247-3272. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2192780>
- Zeighami Nejad, K., Ghasemi, M., Shamili, M., & Damizadeh, G. R. (2020). Effect of Mycorrhiza and Vermicompost on Drought Tolerance of Lime Seedlings (*Citrus aurantifolia* Cv. Mexican Lime). *International Journal of Fruit Science*, 20(3), 646-657. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1678448>