

Fecha de recibido: 13-02-2025

Fecha de aceptado: 27-10-2025

DOI: 10.22490/21456453.9146

EFFECTO DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN RASGOS FUNCIONALES DE *THEOBROMA CACAO* EN VIVERO (CÓRDOBA, COLOMBIA)

EFFECT OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI ON FUNCTIONAL TRAITS OF *THEOBROMA CACAO* IN NURSERY (CÓRDOBA, COLOMBIA)

Daniela Cogollo Roldán¹

José Luis Contreras Santos²

Juan Carlos Linares Arias³

Judith Martínez Atencia⁴

Cindy Katherine Falla Guzmán⁵

Jeyson Garrido Pineda⁶

Wilmar Wilches Ortiz⁷

Citación: 1. Cogollo Roldán, D., Contreras-Santos, J. L., Linares-Arias, J. C., Martínez-Atencia, J., Falla- Guzmán, C. K., Garrido, J. y Wilches Ortiz, W. A. (2026). Efecto de hongos micorrízicos arbusculares en rasgos funcionales de *Theobroma cacao* en vivero (Córdoba, Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 17(2), 11-39. <https://doi.org/10.22490/21456453.9146>

¹ Bióloga, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. dcogolloroldan42@correo.unicordoba.edu.co

² Magíster en Ciencias Agronómicas, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jlcontreras@agrosavia.co

³ Magíster en Ciencias Agrarias, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. jlinares@correo.unicordoba.edu.co

⁴ Doctora en ciencias Agrarias, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jcmartinez@agrosavia.co

⁵ Ingeniera Forestal, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. cfalla@agrosavia.co

⁶ Biólogo, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Colombia. jfgarrido@agrosavia.co

⁷ Magíster en Biotecnología, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Centro de Investigación Tibaitatá, Mosquera, Colombia. wwilches@agrosavia.co

RESUMEN

Contextualización del tema: El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) requiere plántulas vigorosas y fisiología estables durante la etapa de vivero, ya que esta fase condiciona su adaptación, supervivencia y desempeño posterior en campo. En este contexto, el uso de hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA) constituye una estrategia biológica sostenible para mejorar la adquisición de nutrientes, estimular el desarrollo radicular y reducir la dependencia de fertilizantes químicos en los sistemas de producción cacaoteros.

Vacío de conocimiento: A pesar del potencial de los HFMA como bioinsumos, aún existe información limitada sobre la respuesta funcional de plántulas de cacao frente a inóculos individuales procedentes de bancos de germoplasma, en comparación con consorcios micorrícicos nativos asociados a zonas productoras de cacao en el departamento de Córdoba, Colombia.

Propósito del estudio: Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de inóculos individuales de HFMA provenientes del Banco de Germoplasma de Agrosavia y de consorcios nativos de HFMA sobre rasgos funcionales morfológicos, fisiológicos y micorrícicos de plántulas de cacao en etapa de vivero.

Metodología: Se estableció un diseño completamente al azar bajo condiciones de vivero, con nueve tratamientos: seis tratamientos

inoculados con HFMA y tres testigos con diferentes niveles de fertilización química, correspondientes al 100 %, 50 % y 0 % de la dosis recomendada. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. Al finalizar el ciclo experimental, después de cinco meses, se evaluaron rasgos morfológicos y fisiológicos de las plántulas, así como variables asociadas a la simbiosis micorrícica, incluyendo la colonización radicular y la cuantificación de esporas en el suelo rizosférico.

Resultados y conclusiones: La inoculación con HFMA modificó positivamente los rasgos funcionales de las plántulas de cacao. El consorcio nativo de Puerto Libertador (T2) mostró el mejor desempeño, al superar en promedio a los demás tratamientos en 45,6 % en peso seco aéreo, 10,3 % en longitud de raíces finas y 16,9 % en densidad de longitud de raíces. Así mismo, otros tratamientos inoculados con HFMA igualaron o superaron a los controles con fertilización química en varios rasgos morfológicos y fisiológicos. Estos resultados evidencian que la simbiosis micorrícica favorece el crecimiento y desarrollo de plántulas de cacao en vivero, con potencial para reducir de forma parcial el uso de fertilizantes de síntesis química y fortalecer estrategias de manejo sostenible en sistemas cacaoteros.

Palabras clave: fertilización, hongos micorrícicos, nutrición de las plantas, *Theobroma cacao*, rasgos funcionales.

ABSTRACT

Contextualization: Cocoa (*Theobroma cacao* L.) cultivation requires vigorous and physiologically stable seedlings during the nursery stage, as this phase determines their adaptation, survival, and subsequent field performance. In this context, the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) represents a sustainable biological strategy to improve nutrient uptake, stimulate root development, and reduce dependence on chemical fertilizers in cocoa production systems.

Knowledge gap: Despite the potential of AMF as bioinputs, limited information is available on the functional response of cocoa seedlings to individual inocula from germplasm banks compared with native mycorrhizal consortia associated with cocoa-producing areas in the department of Córdoba, Colombia.

Purpose: This study aimed to evaluate the effect of individual AMF inocula from the AGROSAVIA Germplasm Bank and native AMF consortia on the morphological, physiological, and mycorrhizal functional traits of cocoa seedlings under nursery conditions.

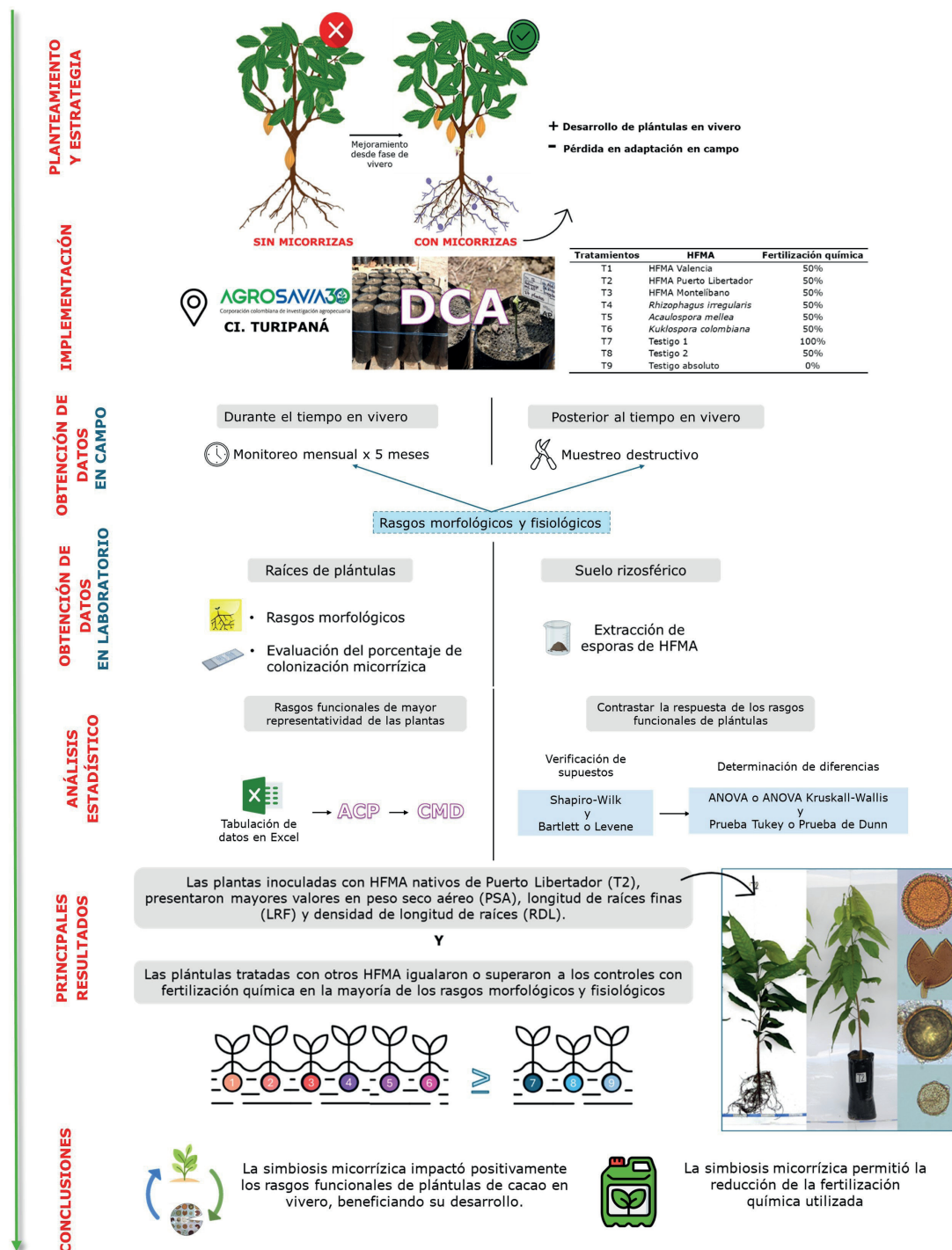
Methodology: A completely randomized design was established under nursery conditions, with nine treatments: six AMF-inoculated treatments and three controls with

different levels of chemical fertilization, corresponding to 100%, 50%, and 0% of the recommended dose. Each treatment included three replicates. At the end of the experimental cycle, after five months, morphological and physiological traits of the seedlings were evaluated, along with variables associated with mycorrhizal symbiosis, including root colonization and spore quantification in the rhizosphere soil.

Results and conclusions: AMF inoculation positively modified the functional traits of cocoa seedlings. The native consortium from Puerto Libertador (T2) showed the best performance, exceeding the other treatments by an average of 45.6% in shoot dry weight, 10.3% in fine-root length, and 16.9% in root length density. Likewise, other AMF-inoculated treatments equaled or outperformed the chemically fertilized controls in several morphological and physiological traits. These results show that mycorrhizal symbiosis promotes the growth and development of cocoa seedlings under nursery conditions, with potential to partially reduce the use of synthetic chemical fertilizers and strengthen sustainable management strategies in cocoa production systems.

Keywords: fertilization; mycorrhizal fungi; plant nutrition; *Theobroma cacao*; functional traits.

RESUMEN GRÁFICO



Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de cacao es de gran importancia económica y cultural, experimenta un crecimiento notable en su demanda global, impulsada por la preferencia hacia productos de fino sabor y aroma. A nivel mundial, países como Costa de Marfil, Ghana e Indonesia lideran la producción. Colombia, a pesar de ser de los menores productores a escala global, se distingue del resto por la alta calidad de su grano, con un 95 % catalogado como fino de sabor y aroma (Abbott et al., 2018; Romero, 2023). A nivel nacional, la producción de cacao ha aumentado en un 61 % en la última década, siendo Santander el departamento con mayor producción, seguido de Antioquia, Arauca, Huila y Tolima (Romero, 2023). Según la UPRA (2023), en el departamento de Córdoba, la producción se concentra en cinco municipios con alta aptitud: Valencia, Tierralta, Montelíbano, Los Córdobas y Puerto Libertador, siendo Valencia el de mayor potencial, con 63.114 hectáreas aptas para el cultivo.

El aumento en la demanda mundial de alimentos ha llevado a un incremento en la producción y uso de plaguicidas y fertilizantes, generando efectos negativos en el medio ambiente, como la degradación del suelo y la eutrofización de fuentes de agua (Nath et al., 2023). Esta problemática se agrava en países como Colombia, donde la expansión agrícola conlleva a la deforestación y al uso intensivo de agroquímicos para mejorar la productividad de suelos poco fértiles (Pulleman et al., 2024). Sin embargo, estos productos generan efectos adversos en el ambiente. En este

sentido, la implementación de nuevas estrategias de fertilización basadas en componentes biológicos constituye una alternativa eficaz para suplir o reducir el uso de fertilizantes de síntesis química (Kakouridis et al., 2022).

Es importante mencionar que el éxito del cultivo de cacao está relacionado con buenas prácticas agrícolas en fase de vivero, donde se aplican técnicas para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de las plántulas. Sin embargo, la eficacia de estas prácticas se mide principalmente en los aspectos foliares, dejando de lado el desarrollo radicular, siendo este de vital importancia en el sostenimiento de las plantas, lo que se entiende, en un óptimo desarrollo radicular le permite al individuo absorber la cantidad necesaria de nutrientes y agua, así como anclaje al suelo (Herrera-Monroy et al., 2023).

Con esto, se hace necesario profundizar en cómo se podría promover el crecimiento total de la planta, en su parte aérea y radicular, asociado al uso de recursos biológicos en lugar de agroquímicos. Una estrategia esencial es el uso de microorganismos, particularmente los hongos formadores de micorriza arbuscular (HFMA), los cuales son simbiontes obligados, endomicorrícicos, de amplia distribución global y diseminados a través del suelo (Branco et al., 2022). Los HFMA aumentan la capacidad de absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas, especialmente fósforo (P) y nitrógeno (N) (Ahammed & Hajiboland, 2024). Como

contrapartida, las plantas hospedadoras proporcionan al hongo simbiote fotosintatos ricos en carbono (C), tales como azúcares y lípidos. Este intercambio bidireccional de nutrientes ejerce una profunda influencia en los ecosistemas vegetales y microbianos, ya que afecta la aptitud de las plantas, los procesos biogeoquímicos del suelo y el ciclo del carbono (Ahammed & Hajiboland, 2024).

Para abordar los desafíos ambientales y potenciar la aptitud de las plántulas de cacao, se propuso la implementación de una estrategia basada en la micorrización. El objetivo de esta investigación fue evaluar seis inóculos de HFMA, individuales del banco y en consorcio nativos frente a testigos con fertilización química, sobre la respuesta de rasgos funcionales de plántulas de cacao.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento y material vegetal

La investigación se desarrolló en el Centro de Investigación Turipaná de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia (8°50'51.58"N - 75°48'55.86"O), localizado en el departamento de Córdoba, municipio de Cereté, con altitud de 18 m s. n. m. (Figura 1), temperatura promedio anual de 28 °C, humedad relativa de 81 %, evapotranspiración potencial de 1240 mm y precipitación promedio anual de 1380 mm (datos de la estación climatológica Turipaná, red agroclimática del IDEAM - número de estación: 13075030). Con dos periodos climáticos definidos, un periodo de lluvias de mayo a noviembre y un periodo de baja pluviosidad de diciembre a marzo. Según (Holdridge, 1982), el área de estudio pertenece a la zona de vida bosque seco tropical (Bs-T). Se implementó el ensayo a nivel de vivero, bajo condiciones ambientales no controladas para la especie *Theobroma cacao*, utilizando almendras del clon IMC 67. Se em-

plearon 27 semillas por tratamiento, con tres repeticiones, para un total de 729 semillas.

Microorganismos: Estudios previos realizados por Agrosavia permitieron seleccionar y consolidar seis inóculos con HFMA, tres de estos corresponden a consorcios nativos aislados de suelos asociados a sistemas agroforestales con cacao, en los municipios de Valencia, Puerto Libertador y Montelíbano. Los otros tres inóculos fueron seleccionados del Banco de Germoplasma administrado por Agrosavia. Estos inóculos estuvieron conformados con esporas de la siguiente forma: el inóculo 1 con esporas nativas del municipio de Valencia; el inóculo 2 de Puerto Libertador; el inóculo 3 de Montelíbano; el inóculo 4 de *Rhizophagus irregularis* (Krüger et al., 2012; Schüssler & Walker, 2010); el inóculo 5 de *Acaulospora mellea* (Schenck et al., 1984) y el inóculo 6 de *Kuklospora colombiana* (Sieverding & Oehl, 2006). La multiplicación de todos los inóculos HFMA se realizó en el Centro de Investigación Tibaitatá de Agrosavia, mediante "cultivo trampa" (Morton et al., 1995) con

hospederos de uchuva (*Physalis peruviana*) en macetas de 500 g de capacidad, utilizando como sustrato suelo: arena estériles (3:1 v/v). El control de calidad del inóculo se realizó siete meses después, mediante la técnica de

tamizado húmedo y decantación propuesta por Gerdemann y Nicolson (1963), con un recuento de 40 a 120 esporas.g⁻¹. En el caso de los consorcios, no se realizó identificación taxonómica de las esporas presentes.

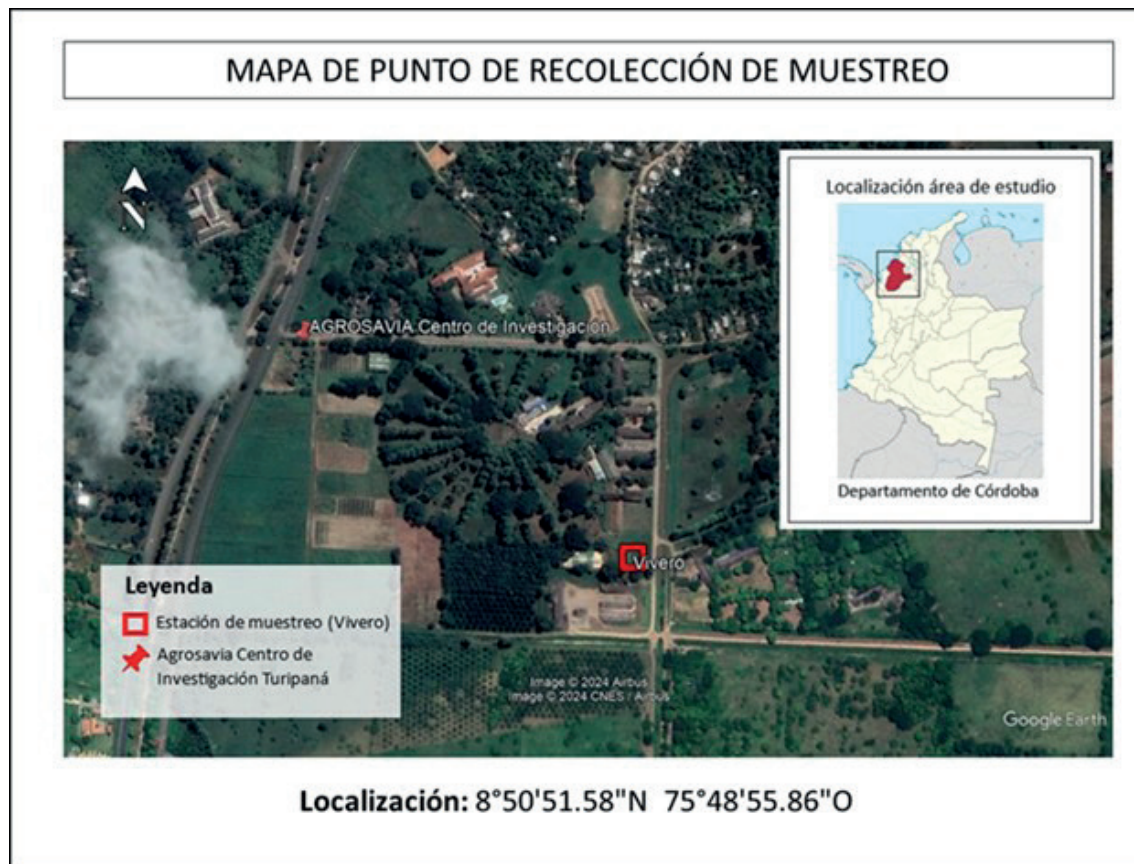


Figura 1. Localización del área de estudio (establecimiento del vivero). Centro de Investigación Turipaná, Cereté, Córdoba, Colombia

Fuente: autores.

Diseño experimental

Se empleó un diseño experimental al azar (DCA) con tres repeticiones y una unidad experimental de 27 plantas. Se evaluó el potencial simbiótico de seis aislamientos de

HFMA más 50 % de fertilización química (NPK) requerida para esta etapa del cultivo, tres de ellos en consorcios y tres individuales, frente a tres testigos con el 100 %, 50 % y 0 % de fertilización química (Tabla 1). Estos ensayos se establecieron usando como sustrato: aluvión, arena y abono orgánico

(2:2:1v/v/v). Se utilizó desinfectante de suelos con ingrediente activo 1.3 Diformil propano para la esterilización del sustrato (aluvión y arena), adicionalmente se utilizó la técnica de solarización durante una semana (siete días) (Katan et al., 1976). Las semillas se sembraron en bolsas de polietileno con dimensiones de 37 cm de longitud, 16 cm de altura y 8 cm de fuelle (volumen total de 4736 cm³). La dosis de inoculante fue de 1 a 2 g, asegurando un total de 70 esporas.g⁻¹ por

planta. La fertilización de los tratamientos se realizó al inicio del experimento, aplicando en dilución fertilizantes químicos de rápida liberación en cuatro momentos (1/4 de dosis quincenalmente), se utilizó una mezcla de 3,2 g fosfato diamónico (DAP) + 0,92 g cloruro de potasio (KCl), con una dosis total de 4,12 g/planta para el testigo 100 % y la mitad de la dosis para el testigo 50 % y los tratamientos con HFMA.

Tabla 1.

Tratamientos para evaluación de HFMA en fase de vivero para la especie *Theobroma cacao*

Tratamientos	Combinación	
	HFMA	Fertilización química
T1	HFMA Valencia	50 %
T2	HFMA Puerto Libertador	50 %
T3	HFMA Montelíbano	50 %
T4	<i>Rhizophagus irregularis</i>	50 %
T5	<i>Acaulospora mellea</i>	50 %
T6	<i>Kuklospora colombiana</i>	50 %
T7	Testigo 1	100 %
T8	Testigo 2	50 %
T9	Testigo absoluto	0 %

Fuente: autores.

Sistema de muestreo y variables analizadas

Se llevó a cabo un monitoreo del crecimiento de plántulas de *Theobroma cacao* en

vivero durante un periodo de cinco meses, con toma de datos mensuales, donde se registraron parámetros morfológicos como: altura de planta (cm), número de hojas y diámetro a la altura del cuello radical (mm). De igual forma, se midió la variable fisiológica de contenido de clorofila, utilizando un

medidor portátil SPAD-502Plus. Al finalizar la etapa de vivero, se tomaron datos de longitud de raíz, peso fresco y seco de parte aérea y radicular, estos se obtuvieron empleando un muestreo destructivo en el que se tomó el 10 % de las unidades experimentales, para un total de 81 muestras. Para efectos de este documento, los datos utilizados corresponden a los relacionados en la evaluación final (cinco meses de las plántulas en vivero). En este punto se tomó una muestra de suelo rizosférico de cada plántula evaluada y se llevó a laboratorio para su posterior lectura con la técnica de cuantificación de esporas de Gerdemann & Nicolson (1963) con algunas modificaciones.

Por otro lado, las raíces finas obtenidas en el muestreo destructivo fueron evaluadas con el escáner Dual Scan (EPSON V850-M), posteriormente, las imágenes generadas se procesaron con el software WinRHIZO Pro-2020®. Finalmente, las muestras se secaron a 60 °C durante 24 horas para la determinación de la biomasa seca de raíz. Los resultados generados por el *software* se exportaron a una base de datos en Excel para su posterior análisis. Así mismo, de forma indirecta se determinaron parámetros como densidad del tejido de raíz (*Root Tissue Density*, RTD), longitud específica de raíz (*Specific Root Length*, SRL) y densidad de longitud de raíz (*Root Length Density*, RLD), siguiendo la metodología descrita por Demenois et al., 2018:

Ecuación 1. $SRL (cm/g) = \frac{L}{M}$; **Ecuación 2.** $RTD (g/cm^3) = \frac{M}{V}$; **Ecuación 3.** $RLD (cm/cm^3) = \frac{L}{v}$

donde L representa la longitud de las raíces finas, M es el peso seco de la raíz, V es el volumen de la raíz y v es el volumen del suelo o sustrato utilizado.

Se realizó tinción de raíces y medición del porcentaje de colonización micorrícica, utilizando el método de intersección de campos, en el cual se seleccionaron y montaron en portaobjetos las raíces teñidas en segmentos paralelos de 1 cm de longitud (Phillips & Hayman, 1970). Para la evaluación se utilizó el objetivo 40X del microscopio, empleando

puntos equidistantes, comenzando por el extremo de cada raíz y en recorrido vertical, en cada campo visual se indica si existe o no colonización, con base en presencia o ausencia de hifas, arbusculos, vesículas, células auxiliares y redes de Hartig de HFMA. Para el cálculo del porcentaje de colonización de HFMA se utilizó la ecuación 4.

Ecuación 4. $Porcentaje\ de\ colonizacion\ HFMA = \frac{Campos\ colonizados\ por\ estructuras\ HFMA}{Total\ de\ campos\ observados} \times 100$

Análisis estadístico

Para identificar los rasgos funcionales de mayor representatividad de las plántulas frente a los inóculos con HFMA, se seleccionó un conjunto mínimo de datos (CMD), utilizando un análisis de componentes principales (ACP) (Contreras-Santos et al., 2023; González García et al., 2021; Silva-Olaya et al., 2022). Este enfoque permitió identificar las variables morfológicas y fisiológicas de las plantas que explican mayormente los procesos en la simbiosis micorrícica de este experimento, con base en predicciones estadísticas.

Los componentes principales retenidos para el análisis fueron aquellos con valores propios mayores a uno (Kaiser, 1960), una regla general que ayuda a simplificar la interpretación de los factores (Martínez Castro et al., 2022). Se consideraron para el análisis las variables con los valores absolutos más altos en cada componente y 10 % por debajo de este valor (Cherubin et al., 2015 y 2016). Se confirmó la relevancia de los factores de los componentes, utilizando un análisis de correlación de Spearman ($P < 0,05$) (Cherubin et al., 2016; Silva-Olaya et al., 2022). Los factores con mayor relevancia y correlación

alta fueron seleccionados dentro de cada componente principal.

Para contrastar la respuesta de los rasgos funcionales de plántulas en vivero al estímulo de inóculos con HFMA asociados a fertilización química, se utilizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett (para datos normales) o Levene (para datos no normales, en caso de ser requerido) para verificar supuestos de normalidad y homocedasticidad de las varianzas de los residuales. Posteriormente, se aplicó un ANOVA con prueba de comparación múltiple de Tukey ($P < 0,05$). En caso de que alguno de los supuestos no se cumpliera, se empleó un ANOVA de Kruskal-Wallis con la prueba *post-hoc* de Dunn como alternativa. Estas pruebas fueron realizadas con el programa estadístico RStudio (R Core Team, 2020).

Se llevó a cabo un análisis de correlación de Spearman con significancia de $P < 0,05$ para determinar la relación entre las variables de rasgos funcionales más representativos, y los niveles de macro y micronutrientes en el tejido foliar de plantas en etapa de vivero. Este análisis se realizó utilizando datos de contenido de nutrientes foliares obtenidos al finalizar el periodo de vivero.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de esporas por tratamiento

Se observó diversidad de morfotipos de HFMA en cada tratamiento. Es importante

destacar la presencia de esporas en los tratamientos testigos con fertilización química, en menor cantidad, lo cual pudo estar asociado a inoculación cruzada (ubicuidad de los HFMA, ya sea en el abono orgánico agregado al sustrato, el agua utilizada en el

riego en vivero, o la proximidad de los tratamientos en el diseño experimental) o a la re-

sistencia de esporas de HFMA en el sustrato previamente esterilizado (Figura 2).

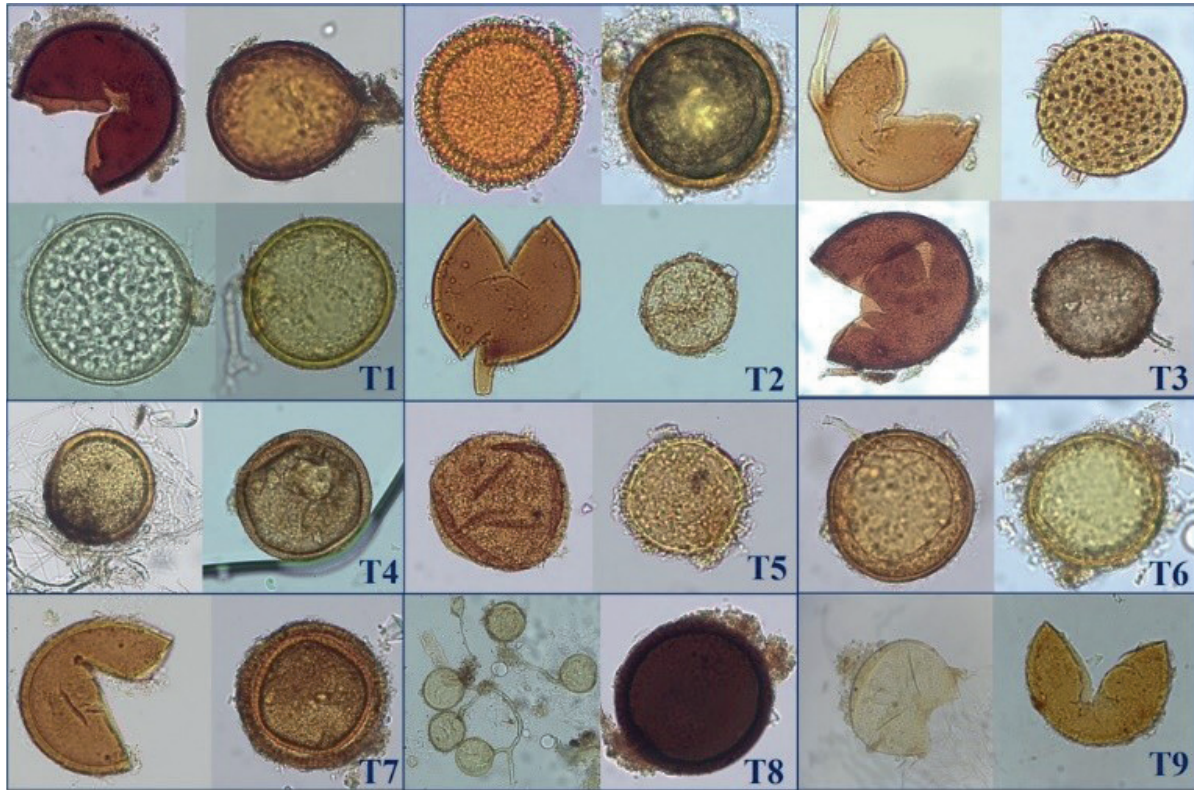


Figura 2. Morfotipos de esporas de HFMA aislados a partir de suelo rizosférico de plántulas de *Theobroma cacao* en condiciones de vivero asociadas a nueve inóculos: T1: HFMA Valencia; T2: HFMA Puerto Libertador; T3: HFMA Montelíbano; T4: *Rhizophagus irregularis*; T5: *Acaulospora mellea*; T6: *Kuklospora colombiana*; T7: 100 % FQ; T8: 50 % FQ; T9: 0 % FQ

Fuente: autores.

El tratamiento T2 con consorcio proveniente del municipio de Puerto Libertador presentó la mayor cantidad promedio de esporas por gramo de sustrato, con 8,9 esporas.g⁻¹, en contraste con el suelo donde se aplicó el tratamiento correspondiente al inóculo nativo de Montelíbano (T3), con el menor número de esporas por gramo de sustrato (5,6 esporas.g⁻¹) (Figura 3).

El proceso de multiplicación de los HFMA aumenta en función de factores ambientales como disponibilidad de humedad, pH y temperatura. Se ha demostrado que el estrés por sequía reduce el potencial de germinación de las esporas, por lo tanto, su aumento en número (Ahammed & Hajiboland, 2024). Los consorcios nativos utilizados en esta investigación presentaron variedad de morfotipos

de HFMA en el mismo inóculo, por lo que el número de esporas finales de cada tratamiento pudo variar, debido a la dinámica de multiplicación del hongo. Es posible que algunas de las especies en los consorcios nativos presentaran mayor capacidad de producción de esporas que otras. Cabe resaltar

que las esporas finales parten de los nuevos procesos de multiplicación de cada hongo al momento de la asociación con el hospedero y para un análisis más detallado sobre la participación de los HFMA en el número final de esporas.g⁻¹ de sustrato, se debe hacer un estudio enfocado a esta actuación.

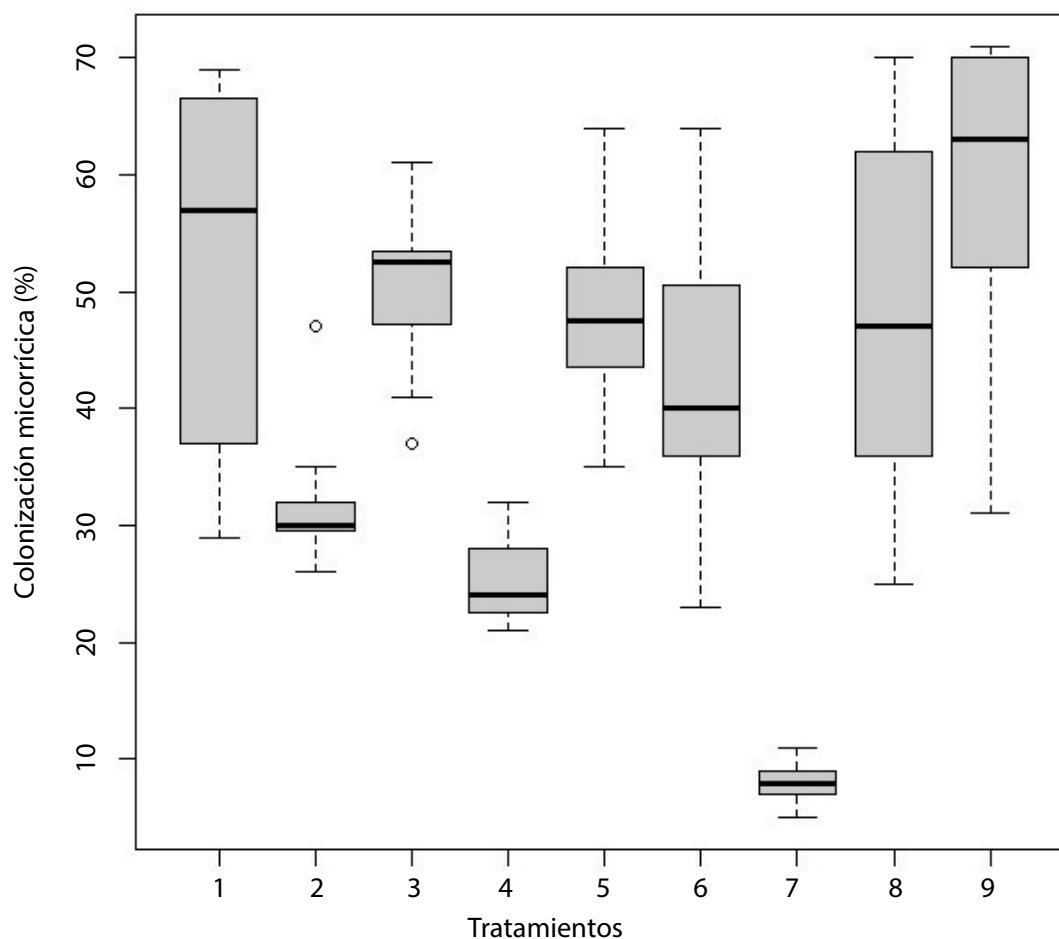


Figura 3. Cuantificación de número de esporas por gramo de sustrato en suelo rizosférico con *Theobroma cacao* en función de la inoculación con HFMA

Fuente: autores.

Colonización micorrícica

De las raíces asociadas a los tratamientos con hongos micorrícicos, se observó que la colonización micorrizal en T1 exhibió mayor porcentaje (52,2 %), mientras que T4 presentó el menor porcentaje de colonización (25,2 %) (Tabla 2). En contraste, las muestras tomadas de T7 con 100 % de fertilización química, reflejaron el menor porcentaje de colonización (7,8 %), respecto a los otros tratamientos. Igualmente, se evidenció la

presencia de estructuras fúngicas en las raíces asociadas al testigo absoluto (T9), con el 58,3 % de colonización micorrícica, siendo el valor más alto de colonización reportado en esta investigación (Figuras 4 y 5). De forma natural, los hongos formadores de micorriza arbuscular se encuentran en comunidades y la mayoría de estos no tiene preferencia de hospederos, por lo cual, varios hongos pueden colonizar una misma raíz (Ramírez Gómez, 2014).

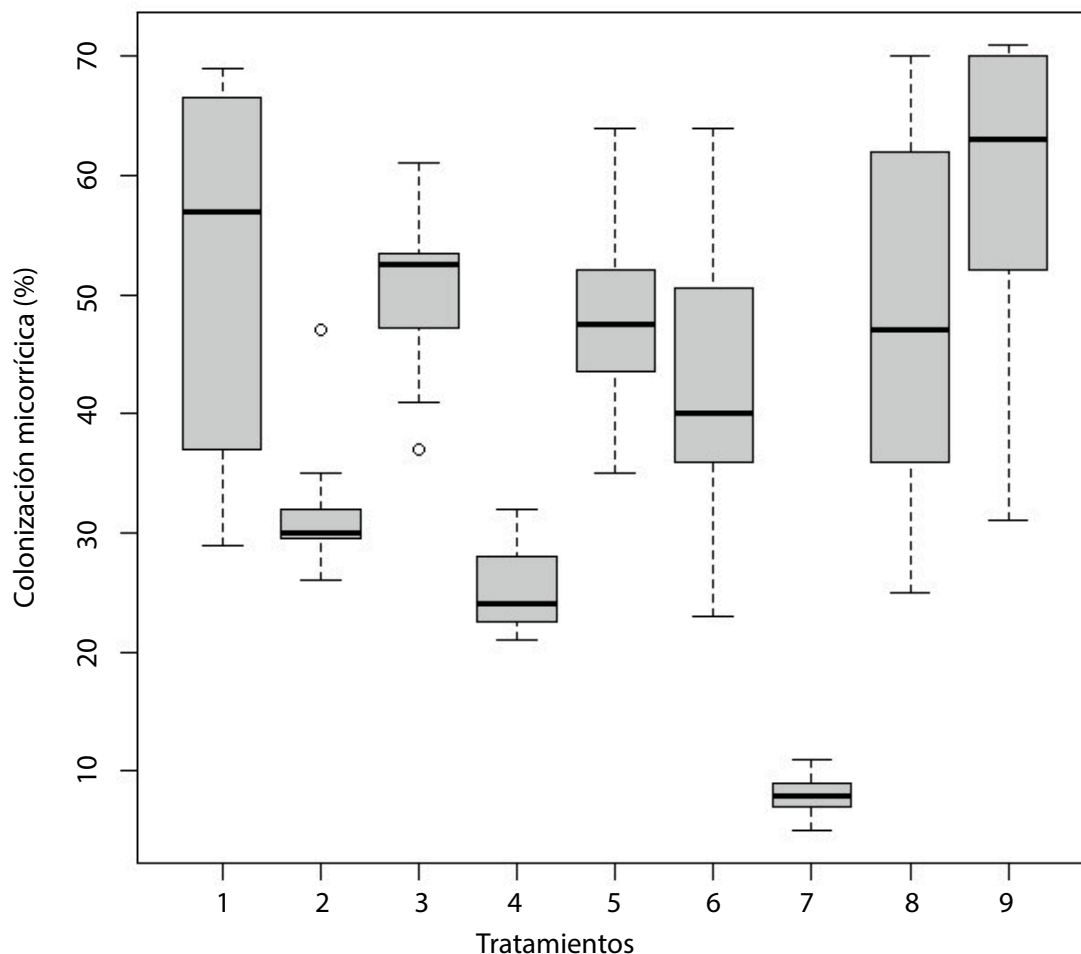


Figura 4. Promedio de colonización micorrícica en plantas de *Theobroma cacao* en función de la inoculación con HFMA y testigos con fertilización química

Fuente: autores.

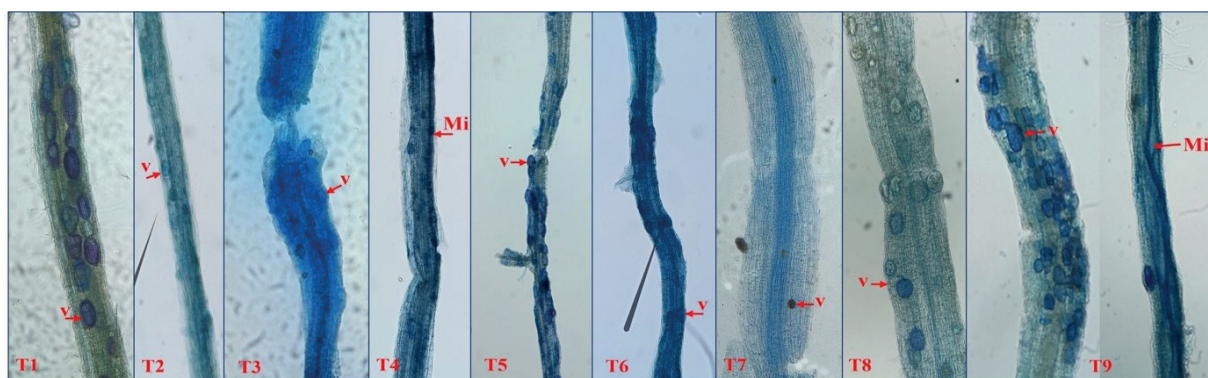


Figura 5. Colonización micorrícica observada en plántulas de *Theobroma cacao* en condiciones de vivero asociadas a seis inóculos y testigos con fertilización química: T1: HFMA Valencia; T2: HFMA Puerto Libertador; T3: HFMA Montelíbano; T4: *Rhizophagus irregularis*; T5: *Acaulospora mellea*; T6: *Kuklospora colombiana*; T7: 100 % FQ; T8: 50 % FQ; T9: 0 % FQ; v: vesículas de HFMA; Mi: micelio interno.

Fuente: autores.

En este caso, las raíces asociadas a consorcios de hongos nativos registraron mayores valores en la colonización con un incremento del 5,9 %, respecto a los inóculos con hongos individuales, lo que concuerda con lo descrito por Hernández-Acosta et al. (2020), donde obtuvo mayor colonización en tratamientos con inóculos respecto a hongos individuales, evaluando la eficiencia de los HFMA en café. Otro estudio realizado en plántulas de tomate obtuvo resultados similares en cuanto a la colonización de los hongos *Rhizophagus* y *Acaulospora* con porcentajes de colonización de 20,19 % y 28,23 %, respectivamente, demostrando la tendencia de estos simbiontes a un grado de asociación menor, encontrándose de forma individual (Suebrasri et al., 2023).

En esta investigación, el tratamiento absoluto, sin fertilización química ni inoculación directa de HFMA, por factores asociados con el método de riego, proximidad de los tratamientos y la ubicuidad de los hongos micorrí-

cicos, o por persistencia de micorrizas oportunistas en el sustrato, se reportó presencia de esporas de HFMA, en consecuencia, se presentó un alto porcentaje de colonización y éxito de la simbiosis, lo que pudo estar relacionado a un estrés nutricional (p. e. deficiencias de fósforo), promoviendo la colonización de las raíces (Cuadros y Gómez, 2010; Ahammed & Hajiboland, 2024).

Por el contrario, T7 (100 % de fertilización química), presentó el valor más bajo de colonización (Figura 4), lo que sugiere una influencia inhibitoria por parte de la fertilización química frente a la asociación micorrícica, probablemente debido a la satisfacción de las necesidades nutricionales de la planta, tal que estudios similares sobre el establecimiento de la simbiosis de HFMA con uchuva, donde el tratamiento testigo con 100 % de fertilización química, obtuvo los valores de colonización más bajos en seis de los siete muestreos que se realizaron (Ramírez Gómez, 2014).

Tabla 2. Descripción de parámetros morfológicos asociados a los tratamientos aplicados a plantas de *Theobroma cacao* en etapa de vivero

TTO	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
ESP	8,4 ± 3,1	8,9±2,5	5,6±3,2	7,7±3,6	6,1±2,1	6,2±2,5	2,5±0,6	3±1,4	4,2±1,4
COL	52,2 ± 16,3	32±6,1	50±7,3	25,2±3,7	48,7 ±8,7	42,7 ±14,7	7,8±2	47,5±16,4	58,3±14,4
AL	74,5±8,6	84,9±7,9	85,1±7,7	86,8±10,7	86,8±3,6	76,9±8	74,3±9,7	84,2±8,9	70,9±4,9
DPRF	0,205±0,006	0,208±0,021	0,21±0,022	0,223±0,012	0,2±0,006	0,213±0,016	0,235±0,006	0,214±0,006	0,198±0,014
RTD	2,02±0,47	3,04±1,45	1,95±0,74	2,4±0,48	1,58±0,79	1,77±0,56	2,08±0,63	2,01±0,23	1,95±0,86
DCR	13,2±1,9	14,3±0,9	12,5±0,8	13,1±1,7	12,5±1	12,3±1,4	14,3±0,9	13,8±0,7	12,4±1
SPAD	39,3±2,6	39,2±1,6	37,7±3,6	35,2	36,9±1,6	35,4±2,3	36,9±2,3	37±3,4	33,9±2,9

ESP = número de esporas.g -1 sustrato; COL= porcentaje de colonización micorrízica; AL = altura de planta;
DCR = diámetro de cuello de raíz; SPAD= contenido de clorofila foliar; DPRF = diámetro promedio de raíces finas;
RTD = densidad de tejido de raíz.

Fuente: autores.

Selección de rasgos funcionales de la planta de cacao en fase de vivero

Se evaluaron 14 variables en cada uno de los nueve tratamientos evaluados en el diseño experimental, distribuidos en: un indicador de la asociación micorrícica, doce parámetros morfológicos y uno fisiológico. El análisis de componentes principales (ACP) de las variables mostró que solo cinco componentes principales (CP) fueron capaces de explicar 71,27 % de la varianza total acumulada (Tabla 3).

Dentro de estos componentes se identificaron los indicadores con mayor peso ab-

soluta (Tabla 3), el CP-1 explicó 22,53 % de la varianza total. Los indicadores con mayor peso absoluto dentro del CP-1 fueron: el peso seco radicular (PSR) y la longitud específica de raíz (SRL) (Tabla 3). El CP-2 explicó 16,77 % de la varianza de los datos, los indicadores de mayor peso fueron: la LRF y el RLD. El CP-3 explicó 14,16 %, siendo los parámetros peso seco aéreo (PSA) y volumen de raíces finas (VRF) los de mayor peso. Los otros CP sumados (CP-4 y CP-5) fueron capaces de explicar 17,8 % de la varianza (Tabla 3), donde los auto vectores dominantes fueron: longitud radicular (LR) en el componente (CP-4) y número de hojas en el componente (CP-5).

Tabla 3.

Análisis de componentes principales (ACP) dentro de las variables evaluadas

Componentes	CP-1	CP-2	CP-3	CP-4	CP-5
Autovalor	3,1544744	2,3481918	1,982915	1,3259395	1,1660451
Varianza (%)	22,53 %	16,77 %	14,16 %	9,47 %	8,33 %
Acumulado (%)	22,53 %	39,30 %	53,47 %	62,94 %	71,27 %
Variable*	Vector propio				
COL	-0,240	-0,157	0,414	-0,211	0,214
AL	0,024	-0,027	-0,064	0,359	0,456
LS	-0,140	-0,051	0,261	0,448	-0,459
PSA	0,139	0,209	0,466	0,285	0,168
PSR	0,487	0,163	0,054	-0,114	-0,114

EFFECTO DE HONGOS MICORRÍCICOS ARBUSCULARES EN RASGOS FUNCIONALES DE *THEOBROMA CACAO* EN VIVERO (CÓRDOBA, COLOMBIA)

Cogollo, D., Contreras, J., Linares, J., Martínez, J., Falla, C., Garrido, J., Wilches, W.

Variable*	Vector propio				
LRF	-0,218	0,532	-0,134	-0,196	-0,118
DPRF	0,370	0,115	-0,188	0,021	-0,165
VRF	0,208	-0,003	-0,500	0,088	0,246
RTD	0,341	0,148	0,396	-0,249	-0,153
SRL	-0,432	0,235	0,031	0,202	0,016
RLD	-0,171	0,565	-0,099	-0,177	-0,137
DCR	0,316	0,302	0,150	0,363	0,149
HOJAS	0,002	0,114	0,198	-0,388	0,516
SPAD	-0,083	0,323	-0,054	0,261	0,249

**Variables descritas en tabla 2.*

Fuente: autores.

La identificación del CMD fue apoyada con el análisis de correlación de Spearman (Figura 6), donde se seleccionó el indicador de mayor peso dentro de cada componente principal (en los casos que el CP mostrara más de un indicador o variable), se tuvo en cuenta correlación significativa entre sí ($p < 0,05$). De acuerdo con esto, para el CP-1, el indicador seleccionado fue el PSR, con

alta correlación significativa negativa con SRL ($r = -0,72$); en el caso del CP-2, se seleccionó la densidad de longitud de raíz (RLD), con correlación significativa con la LRF ($r = 0,91$); en el CP-3, se seleccionó el volumen de raíces finas (VRF), con correlación negativa con el PSA ($r = -0,18$); en el CP-4, se seleccionó la longitud radicular (LS) y CP-5 número de hojas (hojas).

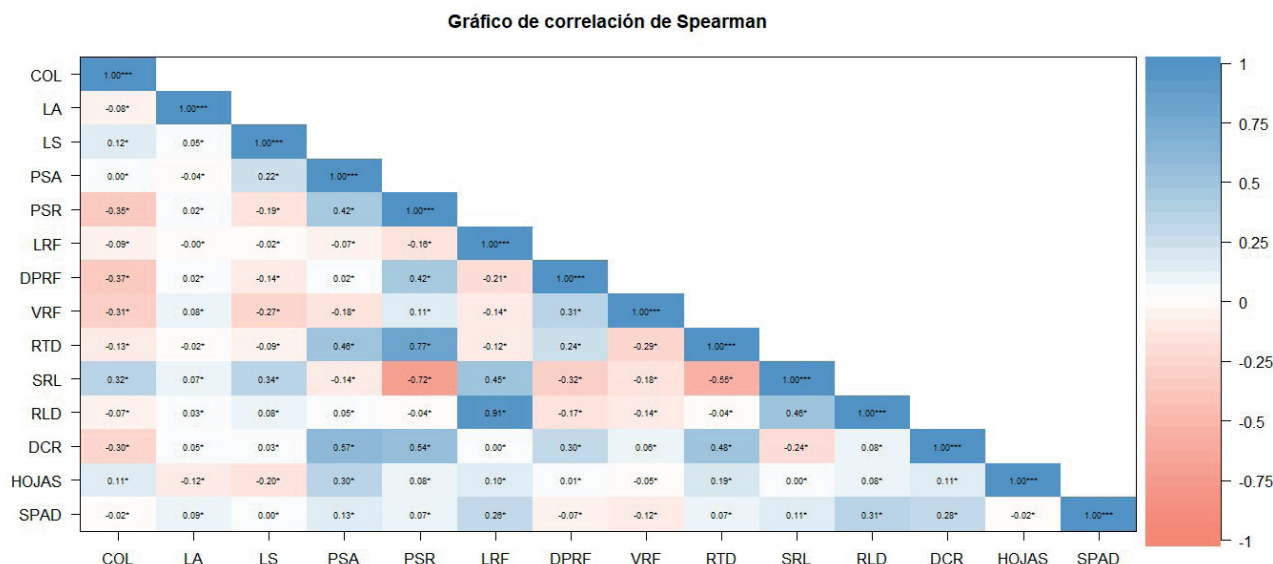


Figura 6. Correlación entre las 14 variables evaluadas a las plántulas de cacao en función la inoculación con HFMA. Correlación de Spearman ($P < 0,05$) *

Fuente: autores.

Efectos de la inoculación con HFMA sobre los rasgos funcionales de las plántulas de cacao

Los resultados obtenidos en este experimento mostraron que la mayoría de las variables evaluadas en el ensayo experimental se vieron afectadas significativamente ($p > 0,05$) por la asociación micorrícica.

El número de hojas (hojas) registró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($p = 0,0000115$). Las plántulas en la etapa final de vivero presentaron mayor número de hojas en T8 (50 % de fertilización química) (54 ± 8 número de hojas), en contraste con T5 (*Acaulospora mellea*) el cual presentó 40 ± 5 hojas (Figura 7A). La capacidad de obtención de luz por parte de las plantas es crucial para un crecimiento óptimo y

la disponibilidad de nutrientes (NPK) juega un papel fundamental en la producción de hojas (Duarte et al., 2019). Otros estudios donde se implementó el uso de bioestimulantes, como HFMA demostraron que la simbiosis micorrícica produce plántulas con mayor número de hojas que los tratamientos con fertilización química (Zulueta et al., 2020; Ramos Otiniano et al., 2021; Rosales Escalon et al., 2022). Sin embargo, estos estudios se enfocaron en etapas de plántulas, mientras que el presente experimento se llevó a cabo desde etapas de semillas, sugiriendo que una menor producción foliar puede ser atribuida a la inversión energética prioritaria de la planta en el desarrollo de la simbiosis micorrícica y un sistema radicular eficiente, en lugar de un crecimiento aéreo acelerado (Wright et al., 2004).

Las plántulas de *T. cacao* en función de los inóculos con HFMA presentaron diferencias significativas en el peso seco aéreo (PSA, $p = 0,004289$) respecto a los tratamientos, siendo T2 (inóculo nativo de Puerto Libertador) donde se obtuvo el mayor registro ($45,57 \pm 15,21$ g) y T6 (*Kuklospora colombiana*) con el valor más bajo ($24,43 \pm 8,17$ g) (Figura 7B). Estos resultados al final del ciclo (etapa de vivero) se pueden explicar por la dinámica de crecimiento y acumulación de la biomasa seca, con incremento inicialmente a una tasa exponencial, posterior lineal y, finalmente, a una tasa decreciente hasta alcanzar un máximo (Di Benedetto y Tognetti, 2016). La colonización micorrícica induce cambios sistémicos en el metabolismo y fisiología de la planta. Los hongos micorrícicos (HFMA) son fuertes sumideros de carbono, debido a su dependencia de carbono de la planta para su propio crecimiento y desarrollo (Ahammed & Hajiboland, 2024). Por lo tanto, los valores de peso seco aéreo (PSA) relativamente bajos entre los tratamientos con hongos y tratamientos con fertilización química, se pueden atribuir a la dependencia del carbono por parte de los HFMA. En una simbiosis efectiva, este costo fisiológico se compensa en la absorción de nutrientes y agua por parte de la planta, además de otros beneficios (Ramírez Gómez, 2014).

Por otro lado, el peso seco radicular (PSR) registró diferencias altamente significantes ($p = 0,0002777$) entre los tratamientos estudiados, con valores altos en las plantas con los tratamientos T2 y T4, con $4,63 \pm 1,08$ g y $4,51 \pm 0,95$ respectivamente, en contraste con T5 (*Acaulospora mellea*), en el cual las raíces presentaron PSR con valores de $2,18 \pm 0,92$ g

(Figura 7C). Algunos autores han registrado resultados similares con relación a la variable peso seco radicular (PSR) en función de la simbiosis micorrícica (Velázquez et al., 2017; Rosales Escalon et al., 2022; Suebrasri et al., 2023). Otras investigaciones han evidenciado la efectividad de la combinación de HFMA (*Rhizoglyphus irregularis*), combinado con compost fosfatado dio lugar a un aumento considerable del peso seco de raíces, así como del rendimiento de las plantas de lechuga, en comparación con las plantas de control (Anli et al., 2022), tal como en el presente estudio, teniendo en cuenta el componente de carbono orgánico presente en el sustrato utilizado en vivero.

La variable de longitud radicular (LR) mostró comportamiento diferencial entre los tratamientos ($p = 0,00000063$), con mayor valor en las plántulas asociadas a T5 (*Acaulospora mellea*) con $43,50 \pm 6,85$ cm, superando los testigos con fertilización química (T8), lo que sugiere una asociación exitosa de los HFMA con la plántula de cacao (Figura 7 D). Sin embargo, T6 (*Kuklospora colombiana*) registró el valor más bajo con $25,67 \pm 4,04$ cm. Autores como Zárate et al. (2009) registraron resultados similares en la respuesta de *Melinis minutiflora*, frente a la inoculación con *K. colombiana*, lo que demuestra un efecto inhibitorio al aumento de la longitud radicular (LR) frente a otros inóculos con HFMA, testigos con fertilización química y testigos absolutos (sin aplicación). Estos resultados dan insumos para inferir que el inóculo *K. colombiana* presentó una falta de adaptación a las condiciones presentadas en vivero, por ende, a una baja efectividad en la simbiosis micorrícica de *K. colombiana* (Mahecha-Vásquez et al., 2017).

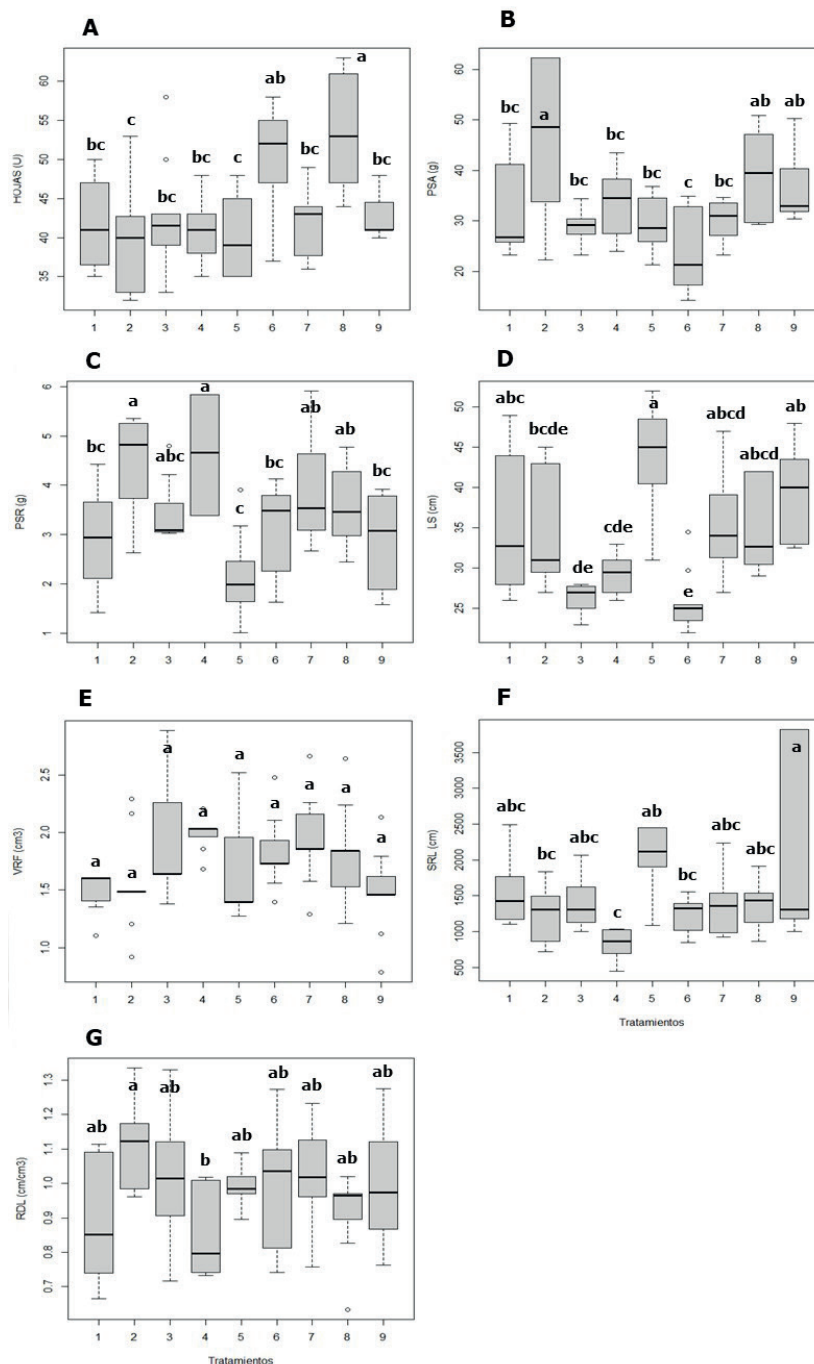


Figura 7 (A, B, C, D, E, F y G). Rasgos funcionales de *Theobroma cacao* (fase de vivero) asociados a inóculos con HFMA. (A) Hojas = número de hojas; (B) PSA = peso seco aéreo; (C) PSR= peso seco radicular; (D) LR = longitud radicular; (E) VRF = volumen de raíces finas; (F) SRL = longitud específica de raíz; (G) RDL = densidad de longitud de raíz. El rasgo funcional VRF no cumplió con los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad (Bartlett).

Fuente: autores.

Para el caso de los rasgos funcionales volumen (VRF) no se observó comportamiento diferencia ($p = 0,0631$) (Figura 7E). En la mayoría de los tratamientos evaluados se puede observar que los tratamientos con inóculos de HFMA mostraron valores similares o superiores a los testigos con fertilización química, indicando los efectos favorables de la inoculación micorrícica respecto a los testigos no inoculados, considerando la disminución de la fertilización química.

En los registros tomados de la variable de longitud específica de raíz (SRL) se evidenciaron diferencias significativas ($p = 0,0003398$) (Figura 7F). Las plántulas sin inoculación y sin fertilización química (Testigo absoluto, T9) mostraron mayores valores respecto a la mayoría de los tratamientos con inóculos de HFMA y fertilización química con $2100,59 \pm 1301,14 \text{ cm.g}^{-1}$, sin embargo, T5 (*Acaulospora mellea*) presentó el segundo valor más alto ($2034,07 \pm 461,11 \text{ cm.g}^{-1}$), mientras que T4 (*Rhizophagus irregularis*) exhibió el menor valor de SRL ($827,33 \pm 205,91 \text{ cm.g}^{-1}$). Estudios previos han demostrado que las raíces con SRL mayor presentan menor dependencia micorrícica, debido a la estrategia de exploración del suelo en la que se invierte más energía en el aumento de la longitud radicular, respecto a la adaptación del diámetro para permitir una asociación micorrícica eficiente (Bergmann et al., 2020), lo que podría evidenciarse en la relación entre la SRL presentada por las plantas con inóculos de HFMA y su diámetro promedio (DPRF) (Tabla 2). Sin embargo, Ramana et al. (2023) han demostrado que el diámetro promedio no solo va enlazado con la capacidad de la planta de

invertir en la expansión del área cortical y su dependencia micorrícica, sino también en la selectividad que presente la raíz a la hora de aceptar un micosimbionte, sugiriendo que raíces finas interactúan con un mayor número de hongos de naturaleza generalista, contrario al caso de *Rhizophagus irregularis*. En el tratamiento inoculado con esta especie se evidenciaron raíces más gruesas y con menor SRL, con un porcentaje de colonización bajo, respecto a los demás tratamientos lo que supone que las raíces más gruesas tienden a ser más específicas en la permisión de la relación micorrícica, contrario al tratamiento absoluto (T9), el cual presentó raíces con mayor longitud específica, raíces más finas y colonización alta, probablemente de hongos generalistas.

En el caso de la densidad de longitud de raíz (RDL), se observaron diferencias significativas ($p = 0,0202$) entre los tratamientos (Figura 7G). De los nueve tratamientos, siete presentaron comportamiento similar, excepto T2 y T4. Los valores de las plántulas con el inóculo nativo de Puerto Libertador (T2) fueron mayores con $1,12 \pm 0,15 \text{ cm.cm}^{-3}$, en contraste con T4 (*Rhizophagus irregularis*), con el menor valor ($0,85 \pm 0,13 \text{ cm.cm}^{-3}$) (Figura 7G). Otros estudios presentaron resultados similares, con comportamiento similar del rasgo funcional densidad de longitud bajo implementación de hongos micorrícicos y sin ellos (Guevara y Guenni, 2013; Ithurrart et al., 2018). Se ha encontrado que este rasgo (RLD) varía en función de la especie y la etapa de desarrollo de planta, la profundidad del suelo, las condiciones edafológicas, entre otros factores (Pascual-Córdova et al., 2023), por lo que, a falta de resultados

que soporten el efecto de los HFMA y su efecto sobre la RDL, no se podría identificar una presión de los inóculos de HFMA en las plántulas de cacao, aun cuando otros estudios han encontrado el efecto de estos simbiontes en la inducción de la planta a

incrementar sus raíces laterales al momento de presentarse la asociación micorrícica, con el fin aumentar la exploración del suelo (Méndez et al., 2021; Ahammed & Hajiboland, 2024).

4 CONCLUSIONES

Se evidenció la efectividad simbiótica de las micorrizas arbusculares, indicando un mayor desarrollo de la plántula en función de los micosimbiontes, respecto a los controles con fertilización química. El inóculo que resultó con mejor potencial simbiótico fue el consorcio de HFMA nativo del municipio de Puerto Libertador, seguido de *Rhizophagus irregularis*. De lo anterior se puede inferir que los consorcios de HFMA y de forma individual pueden lograr beneficios en las plántulas de cacao, reflejados en estrategias de crecimiento, captación de nutrientes y preferencia con la raíz, lo cual se evidencia en el aumento de rasgos funcionales como la biomasa aérea, la longitud específica radicular y la densidad de longitud de raíces finas.

Las plántulas en función de inóculos de hongos micorrícicos arbusculares (MA) mostraron un aumento en los valores de rasgos funcionales de respuesta (tanto aéreos como radiculares) asociados a una aptitud física óptima para el trasplante a campo.

La reducción de la fertilización química sin detrimento del desarrollo de las plántulas evidencia la importancia de la simbiosis micorrícica como herramienta potencial para una producción vegetal más sostenible.

La relación estimada entre los nutrientes y los rasgos funcionales de raíz no es unidireccional, mostrando que un mismo rasgo puede intervenir en la absorción de varios nutrientes. Cabe mencionar que los análisis del tejido foliar de las plantas con micorrizas mostraron mayores registros en el contenido de nutrientes, frente a los testigos con 100 % y 50 % de fertilización química, lo que sugiere una simbiosis exitosa en términos de absorción y contenido de nutrientes en hojas.

Este estudio se puede convertir en una base para futuras aplicaciones del potencial de los HFMA en condiciones de vivero y campo, abriendo brechas poco estudiadas como la de contaminación cruzada de HFMA y micorrizas oportunistas.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Autor 1: redacción del documento, captura de información en campo, tabulación de información, revisión y edición.

Autor 2: director de tesis, metodología, análisis de información, redacción, revisión y edición.

Autor 3: director de tesis, evaluador, revisión y edición documento.

Autor 4: metodología, análisis de información, supervisión del proyecto, investigadora líder, revisión y edición.

Autor 5: metodología, captura de información en campo, construcción de bases de datos, análisis de información, revisión y edición.

Autor 6: metodología, captura de información en campo, procesamiento y análisis de información, revisión y edición.

Autor 7: selección de inóculos HFMA, metodología, revisión y edición.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), al OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación

de la investigación en el marco del proyecto “Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el departamento de Córdoba”.

FINANCIAMIENTO

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), al OCAD de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación por la financiación de la investigación en el marco del proyecto

“Implementación de tecnologías de producción para el fortalecimiento de la cadena de valor de cacao y la sostenibilidad ambiental del sistema productivo en el departamento de Córdoba”, presentado en la convocatoria número 18 con el código de proyecto BPIN: 2021000100511.

USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

No aplica

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de interés que pueda haber influido en los resultados ni en la interpre-

tación de los datos presentados en este artículo.

LITERATURA CITADA

- Abbott, P.C., Benjamin, T.J., Burniske, G.R., Croft, M.M., Fenton, M., Kelly, C.R., Lundy, M., Rodriguez Camayo, F., Wilcox M.D. (2018). An analysis of the supply chain of cacao in Colombia. United States Agency for International Development - USAID. Cali. CO. 208 p.
- Ahammed, G. J., & Hajiboland, R. (2024). Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants. In Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Higher Plants. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-8220-2>
- Anli, M., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Ait-Rahou, Y., Fakhech, A., & Meddich, A. (2022). Improving Lettuce Yield and Quality of an Agricultural Soil Using a Combination of Arbuscular Mycorrhizal Fungus and Phosphate-Green Wastes Compost. *Gesunde Pflanzen*, 74(1), 205-217. <https://doi.org/10.1007/s10343-021-00603-0>
- Bergmann, J., Weigelt, A., van der Plas, F., Laughlin, D. C., Kuyper, T. W., Guerrero-Ramirez, N., Valverde-Barrantes, O. J., Bruelheide, H., Fresche, G. T., Iversen, C. M., Kattge, J., McCormack, M. L., Meier, I. C., Rillig, M. C., Roumet, C., Semchenko, M., Sweeney, C. J., van Ruijven, J., York, L. M., & Mommer, L. (2020). The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants. *Science Advances*, 6(27). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba3756>
- Branco, S., Schauster, A., Liao, H. L., & Ruytinx, J. (2022). Mechanisms of stress tolerance and their effects on the ecology and evolution of mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, 235(6), 2158-2175. <https://doi.org/10.1111/nph.18308>
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., Oliveira, D. M. da S., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2015). Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils-Effects of land use change on soil chemical attributes.

- Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211, 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS ONE*, 11(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Rodríguez-Vitola, J. L., Barragán-Hernández, W., Garrido-Pineda, J. y Falla-Guzmán, C. K. (2023). Índice de Calidad del Suelo Bajo Sistemas Agropecuarios en el Bosque Seco Tropical-Colombia. *Revista Terra Latinoamericana*, 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1694>
- Cuadros, G. A. y Gómez, R. (2010). Asociación simbiótica entre hongos micorrízicos arbusculares y el sistema radicular de plántulas de cacao (*Theobroma cacao* L.): efecto de la formononetina y la disponibilidad de fósforo en el suelo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 12(1), 77-85. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num1_art:217
- Demenois, J., Carriconde, F., Bonaventure, P., Maeght, J. L., Stokes, A., & Rey, F. (2018). Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. *Geoderma*, 312, 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.033>
- Di Benedetto, A. y Tognetti, J. (2016). Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(3), 258-282. <chrome-extension://efaidnbmn-nibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/864/86449712008.pdf>
- Duarte Hernández, D., Gutiérrez-Rodríguez, E. A., Báez Alonso, N., Klammer de Almeida, G., Pereira Gonzatto, M., Bettio Marodin, G. A. y Belmonte Petry, H. (2019). Manejo de la luz en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). 10.13140/RG.2.2.22753.07523
- Gerdemann, J. W., & 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. [https://doi.org/10.1016/s0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/s0007-1536(63)80079-0)
- González García, H., González Pedraza, A. F., Rodríguez Yzquierdo, G., León Pacheco, R., & Betancourt Vásquez, M. (2021). Vigor en plantas de plátano (*Musa AAB* cv. Hartón) y su relación con características físicas, químicas y biológicas del suelo. *Agronomía Costarricense*, 45(2). <https://doi.org/10.15517/rac.v45i2.47772>
- Guevara, E. y Guenni, O. (2013). Densidad y longitud de raíces en plantas de *Leucaena leucocephala* (Lam) De Wit. *Multiciencias*, 13(4), 372-380. <chrome-extension://efaidnbmn-nibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/904/90430055005.pdf>
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Rivera-Fernández, A. y Ferrera-Cerrato, R. (2020). La micorriza arbuscular como biofertilizante en cultivo de café. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(3). <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.659>

- Herrera-Monroy, S., Herrera-Monroy, M., & Rivera-Ramírez, J. M. (2023). Revisión sistemática en torno a los hongos micorrízicos arbusculares y su importancia ecológica. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(2), 1-18. <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2022.03.07>
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 53(9).
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Ithurrart, L. S., Busso, C. A., Torres, Y. A., Peláez, D. V., Giorgetti, H., Rodríguez, G., & Ambrosino, M. L. (2018). Root traits and arbuscular mycorrhiza on perennial grasses exposed to defoliation after a controlled burning. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 87, 51-59. <https://doi.org/10.32604/phyton.2018.87.051>
- Kaiser, H. F. (1960). The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1). <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Kakouridis, A., Hagen, J. A., Kan, M. P., Mambelli, S., Feldman, L. J., Herman, D. J., Weber, P. K., Pett-Ridge, J., & Firestone, M. K. (2022). Routes to roots: direct evidence of water transport by arbuscular mycorrhizal fungi to host plants. *New Phytologist*, 236, 210-221. <https://doi.org/10.1111/nph.18281>
- Katan, J., Greenberger, A., Alon, H., & Grinstein, A. (1976). Solar heating by polyethylene mulching for the control of diseases caused by soilborne pathogens. *Phytopathol*, 115(8V), 683-688. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/Phyto-66-683>
- Krüger, M., Krüger, C., Walker, C., Stockinger, H., & Schüßler, A. (2012). Phylogenetic reference data for systematics and phylotaxonomy of arbuscular mycorrhizal fungi from phylum to species level. *New Phytologist*, 193, 970-984. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03962.x>
- Mahecha-Vásquez, G., Sierra, S., & Posada, R. (2017). Diversity indices using arbuscular mycorrhizal fungi to evaluate the soil state in banana crops in Colombia. *Applied Soil Ecology*, 109, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.09.017>
- Martínez Castro, C. J., Kido Cruz, M. T., Ureña Castillo, F. D., Zúñiga Marroquín, T. y Aguilar Martínez, C. U. (2022). Indicadores indirectos de bienestar bovino en el municipio de Loma Bonita, Oaxaca, México. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 33(1). <https://doi.org/10.15381/rivep.v33i1.20218>
- Méndez-Gálvez, S., Esquivel-Quispe, R., & Ochoa-Yupanqui, W. W. (2021). Indicadores de colonización de hongos micorrízicos arbusculares en “papa” (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of the Selva Andina Biosphere*, 9(1), 53-63. <https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090100053x>

- Morton, J. B., Bentivenga, S. P., & Bever, J. D. (1995). Discovery, measurement, and interpretation of diversity in arbuscular endomycorrhizal fungi (Glomales, Zygomycetes). *Canadian Journal Botany*, 73(1), S25-S32. <https://doi.org/10.1139/b95-221>.
- Nath, A., Bhuyan, P., Gogoi, N., & Deka, P. (2023). Pesticides and Chemical Fertilizers: Role in Soil Degradation, Groundwater Contamination, and Human Health. In Singh, R., Singh, P., Tripathi, S., Chandra, K.K., Bhadouria, R. (eds) *Xenobiotics in Urban Ecosystems*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35775-6_7
- Pascual-Córdova, G., Palma-López, J. D., Obrador-Olán, J. J., García-López, E., Carrillo-Ávila, E., Sánchez-Soto, S. y Córdova-Sánchez, A. (2023). Diagnóstico nutrimental y distribución de densidad de longitud de raíces finas en *Acacia mangium* Willd. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1). <https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3492>
- 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)
- Pulleman, M. M., Rahn, E. y Valle Pilia, J. F. (2024). *Agricultura regenerativa para sistemas cafeteros resilientes y con bajas emisiones de carbono - Una guía práctica* (versión 1.0). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- R Core Team. (2020). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.
- Ramana, J. V., Tylanakis, J. M., Ridgway, H. J., & Dickie, I. A. (2023). Root diameter, host specificity and arbuscular mycorrhizal fungal community composition among native and exotic plant species. *New Phytologist*, 239, 301-310. <https://doi.org/10.1111/nph.18911>
- Ramírez Gómez, M. M. (2014). *Evaluación de la diversidad de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) y su relación con el establecimiento de simbiosis con Physalis peruviana L.* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/47260>
- Ramos Otiniano, C. C., Hidalgo Rodríguez, J. E. M., Vera Vega, M.Á., Pedro Huaman, J. J., Rodríguez Seminario, C. E. y Chaman Medina, M. E. (2021). Efecto del NaCl y micorrizas (*Rhizophagus irregularis*) en el crecimiento de “tomate” *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae). *Arnaldoa*, 28(3), 675-692. <https://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28312>
- Romero, F. (2023). Contexto de cadena cacao. *Agrosavia*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/37966>
- Rosales Escalon, J. Y., Pérez Ruiz, L. E., Sánchez Gómez, I. y Cruz-Castillo, J. B. (2022). Micorrizas arbusculares y su efecto sobre el desarrollo vegetativo de portainjertos de limón (*Citrus limon* L.). *Revista Cien-*

- tífica La Calera, 22(38), 9-14. <https://doi.org/10.5377/calera.v22i38.14152>
- Schenck, N. C., Spain, J. L., Sieverding, E., & Howeler, R. H. (1984). Several new and unreported vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (Endogonaceae) from Colombia. *Mycologia*, 76(4), 685-699. <https://doi.org/10.1080/00275514.1984.12023899>
- Schüßler, A., & Walker, C. (2010). *The Glomeromycota: A species list with new families and new genera*. Arthur Schüßler & Christopher Walker, Gloucester, UK. https://www.researchgate.net/publication/285775809_The_Glomeromycota
- Sieverding, E., & Oehl, F. (2006). Revision of *Entrophospora* and description of *Kuklospora* and *Intraspora*, two new genera in the arbuscular mycorrhizal Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 80(1). <https://ojs.openagrar.de/index.php/JABFQ/article/view/2192>
- Silva-Olaya, A. M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K. L., Cherubin, M. R., Duran-Bautista, E. H., & Ortiz-Morea, F. A. (2022). Silvopastoral systems enhance soil health in the amazon region. *Sustainability*, 14(1), 320. <https://doi.org/10.3390/su14010320>
- Suebrasri, T., Seemakram, W., Lapjit, C., Mongkolthanaruk, W., & Boonlue, S. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on enhancing growth, fruit quality, and functional substances in tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Plant Biotechnology*, 50, 239-247. <https://doi.org/10.5010/JPB.2023.50.030.239>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA]. (2023). *Plan de Ordenamiento Productivo para la Cadena de Cacao y su Agroindustria*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://upra.gov.co/es-co/planificacion-del-ordenamiento-agropecuario/poa-nacional/pop/pop-cacao>
- Velázquez, M. S., Cabello, M. N., Eliades, L. A., Russo, M. L., Allegrucci, N. y Schalamuk, S. (2017). Combinación de hongos movilizadores y solubilizadores de fósforo con rocas fosfóricas y materiales volcánicos para la promoción del crecimiento de plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). *Revista Argentina de Microbiología*, 49(4), 347-355. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.07.005>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornellssen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., ... Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821-827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>
- Zárate Quiroga, L. M., Sánchez de Prager, M. y Barrios, E. (2009). Respuesta de Melinis minutiflora a la inoculación con hongos micorrízico arbusculares en un Inceptisol de Colombia. *Acta Agronómica*, 58(4), 225-233. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/12449
- Zulueta-Rodríguez, R., Gómez-Merino, F. C., Alemán-Chávez, I., Núñez-Camargo, M. del C. y Lara-Cap-

istrán, L. (2020). Respuesta del cultivo de
maíz a la bio-inoculación y fertilización
química reducida en campo. *Revista Terra*

Latinoamericana, 38(3), 597-612. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.656>

Conflicto de intereses
Los autores declaran no tener
ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons
Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.