

Simbiosis Micorrízica Arbuscular como Mecanismo de Tolerancia de *Brachiaria decumbens* al Estrés Combinado por Plomo y Aluminio en Condiciones de Invernadero

Arbuscular Mycorrhizal symbiosis as a Tolerance Mechanism of *Brachiaria decumbens* to Combined Lead and Aluminum Stress Under Greenhouse Conditions

Oscar Oswaldo Prieto-Benavides^{1†} , Hayron Fabricio Canchignia-Martínez² ,
Fernando Abasolo-Pacheco² , Jenniffer Liseth Vivanco-Ube³  y
Magina Noelia Sánchez-Loor¹ 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Campus Experimental La María, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental; (O.O.P.B), (M.N.S.L). ² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales; (H.F.C.M.), (F.A.P). Vía Quevedo-El Empalme km 7.5, Sector La María. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador. [†]Autor para correspondencia: oprieto@uteq.edu.ec
³ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Posgrado, Maestría en Agroecología y Desarrollo Sostenible. Av. Quito km 1.5, Vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador; (J.L.V.U.).

RESUMEN

La presente investigación abordó la contaminación de suelos agrícolas por plomo (Pb) y aluminio (Al), elementos que limitan el crecimiento vegetal y comprometen la sostenibilidad agropecuaria. Se evaluó en invernadero el potencial de consorcios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) de los géneros *Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora* para mitigar estos efectos en *Brachiaria decumbens*. Los resultados mostraron que la inoculación con HMA mejoró el crecimiento. En el tratamiento I2_C3, el diámetro de tallo alcanzó 1,6 cm y la altura superaron los 90 cm a los 75 días con *Acaulospora*. El peso húmedo foliar fue de 27 g en I2_C3 frente a 22 g en I1_C3, mientras que el peso seco foliar llegó a 17-18 g, confirmando la eficiencia de *Acaulospora* bajo estrés metálico. En raíces, I3_C2 alcanzó 50 cm de longitud, duplicando a I1_C1. Respecto a la acumulación de metales, los tratamientos con I3 mantuvieron niveles intermedios de Pb (13 y 18 mg kg⁻¹) en comparación con I1_C3 (28 mg kg⁻¹). Para el Al, los valores fueron elevados en todos los tratamientos contaminados, llegando a 420 mg kg⁻¹, aunque sin afectar la biomasa en I1. El análisis de componentes principales explicó el 64,28 % de la variabilidad total, evidenciando correlación negativa entre metales y variables de crecimiento, confirmando el papel modulador de la simbiosis micorrízica. La caracterización morfológica validó la presencia de *Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora*, resaltando la diversidad funcional de los consorcios. Estos hallazgos demuestran que la selección de HMA, especialmente *Acaulospora*, constituye una estrategia biotecnológica eficaz para mejorar el crecimiento de *B. decumbens* y reducir la acumulación de metales.

Palabras clave: biomasa vegetal, biorremediación, hongos benéficos, metal pesado, suelo.

SUMMARY

The present study addressed the contamination of agricultural soils by lead (Pb) and aluminum (Al), elements that restrict plant growth and compromise agricultural sustainability. A greenhouse experiment was conducted to assess the potential of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) consortia from the genera *Glomus*, *Acaulospora*, and *Gigaspora* to mitigate these effects in *Brachiaria decumbens*. The results demonstrated that AMF inoculation enhanced plant growth. In treatment I2_C3, stem diameter reached 1.6 cm and plant height exceeded 90 cm at 75 days with *Acaulospora*. Leaf fresh weight reached 27 g in I2_C3 compared with 22 g in I1_C3,



Cita recomendada:

Prieto-Benavides, O. O., Canchignia-Martínez, H. F., Abasolo-Pacheco, F., Vivanco-Ube, J. L., & Sánchez-Loor, M. N. (2026). Simbiosis Micorrízica Arbuscular como Mecanismo de Tolerancia de *Brachiaria decumbens* al Estrés Combinado por Plomo y Aluminio en Condiciones de Invernadero. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-17. e2468. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2468>

Recibido: 2 de diciembre de 2025.
Aceptado: 21 de enero de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Abril de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 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/>).

while leaf dry weight ranged from 17 to 18 g, confirming the efficiency of *Acaulospora* under metal stress. For root development, I3_C2 achieved a length of 50 cm, doubling that of I1_C1. Regarding metal accumulation, I3 treatments maintained intermediate Pb levels (13–18 mg kg⁻¹) compared with I1_C3 (28 mg kg⁻¹). In the case of Al, concentrations were high across all contaminated treatments, reaching up to 420 mg kg⁻¹, although without compromising biomass in I1. Principal component analysis explained 64.28% of the total variability, revealing a negative correlation between metal concentrations and growth variables, thus confirming the modulatory role of AMF symbiosis. Morphological characterization verified the presence of *Glomus*, *Acaulospora*, and *Gigaspora*, highlighting the functional diversity of the consortia. These findings demonstrate that the selection of AMF, particularly *Acaulospora*, represents an effective biotechnological strategy to enhance the growth of *B. decumbens* and reduce metal accumulation.

Index words: plant biomass, bioremediation, beneficial fungi, heavy metal, soil.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de recursos forrajeros sostenibles y de alta calidad constituye uno de los principales retos para los sistemas agropecuarios modernos (Chand, Indu, Singhal y Govindasamy, 2022). En el contexto actual, marcado por el cambio climático, la intensificación agrícola y la degradación de los suelos, las especies forrajeras de alto rendimiento representan un pilar estratégico para garantizar la seguridad alimentaria y la productividad pecuaria (Valencia, 2025). Entre estas especies, Mutimura y Ghimire (2021) mencionan que *Brachiaria decumbens* ha adquirido relevancia global por su capacidad de adaptación a diversos ambientes edáficos y por su aporte significativo en la producción de biomasa destinada a la alimentación ganadera. Sin embargo, Padhiary y Kumar (2024) indican que la expansión agrícola y las actividades extractivas asociadas a la minería, el uso intensivo de agroquímicos y la deposición atmosférica de contaminantes han incrementado de forma alarmante la presencia de metales pesados en los suelos de regiones tropicales y subtropicales. Elementos como el plomo (Pb) y el aluminio (Al), aunque naturalmente presentes en algunos suelos, alcanzan niveles fitotóxicos bajo condiciones de acidificación y acumulación antrópica. Esta problemática compromete directamente la fertilidad de los suelos, limita la absorción de nutrientes esenciales y, en consecuencia, reduce drásticamente la productividad de los pastos utilizados en la ganadería (Guerra-Sierra, Muñoz y Sokolski, 2021).

En Ecuador, los sistemas ganaderos de la región litoral y amazónica se desarrollan en suelos mayoritariamente ácidos y de baja fertilidad, lo que facilita la biodisponibilidad de Pb y Al. La exposición continua de especies forrajeras a estos elementos provoca alteraciones morfofisiológicas, afectando la elongación radicular, la captación de agua y nutrientes, y la acumulación de biomasa aérea. Esto no solo repercute en la calidad del forraje, sino que puede implicar riesgos para la salud animal y humana, debido a la transferencia de metales pesados a lo largo de la cadena trófica (Rehman *et al.*, 2025). Diversos estudios han documentado que la presencia de metales pesados en la rizosfera induce estrés oxidativo, disminuye la actividad enzimática y altera los procesos metabólicos de las plantas (Mohanty y Selvaraj, 2025). Frente a estos desafíos, se requiere el desarrollo de estrategias biotecnológicas que permitan atenuar los efectos tóxicos de los metales y, al mismo tiempo, promover el crecimiento vegetal en condiciones adversas. La investigación en simbiosis suelo-planta-microorganismos se presenta como una vía prometedora para alcanzar este objetivo, con especial énfasis en los hongos micorrízicos arbusculares (HMA).

Según Zhang *et al.* (2024), los HMA, ampliamente distribuidos en ecosistemas naturales y agrícolas, establecen relaciones simbióticas mutualistas con las raíces de la mayoría de las plantas superiores. A través de esta interacción, el hongo recibe compuestos carbonados derivados de la fotosíntesis, mientras que la planta obtiene nutrientes minerales, principalmente fósforo y nitrógeno, así como una mayor tolerancia a factores de estrés biótico y abiótico. Diversas investigaciones han demostrado que los HMA actúan como bioestabilizadores de metales pesados, inmovilizándolos en las hifas o en la matriz del suelo, reduciendo su translocación hacia los tejidos vegetales y favoreciendo así la supervivencia y productividad de las plantas en ambientes contaminados (Pérez-Moncada *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2024). En estudios internacionales, la inoculación con HMA ha mostrado un efecto positivo en la biomasa foliar, el desarrollo radicular y la calidad nutricional de especies forrajeras cultivadas en suelos con Pb y Al (Khanum *et al.*, 2024). Estas evidencias han motivado el interés por explorar y caracterizar los HMA presentes en agroecosistemas locales, identificando aquellos consorcios con mayor capacidad de tolerancia y simbiosis efectiva. A pesar de estos avances, en Ecuador aún existe una limitada información sobre la diversidad funcional de los HMA y su papel específico en la mitigación de metales pesados en *B. decumbens*.

De manera particular, el reto radica en determinar si la inoculación con HMA puede convertirse en una herramienta biotecnológica de manejo de suelos degradados y contaminados, mejorando el rendimiento de cultivos forrajeros sin recurrir a métodos costosos o ambientalmente riesgosos. La posibilidad de generar consorcios microbianos adaptados a las condiciones edáficas de la región abre una oportunidad para fortalecer sistemas ganaderos sostenibles, reducir el impacto ambiental y aportar a la bioeconomía local (Guzman *et al.*, 2021). En este contexto, surge la pregunta de investigación que guía este estudio: ¿puede la simbiosis micorrízica arbuscular atenuar los efectos tóxicos del plomo y aluminio sobre el crecimiento y desarrollo de *B. decumbens* en condiciones controladas de invernadero?. Esta investigación pretende responder a dicha pregunta mediante la caracterización de HMA nativos y su evaluación en condiciones experimentales, generando conocimiento aplicable a la gestión de suelos contaminados y al desarrollo de sistemas agropecuarios resilientes en el Ecuador.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Química y Microbiología y en el invernadero del Campus Experimental "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), ubicado en el km 7.5 de la vía Quevedo-El Empalme, cantón Mocache, provincia de Los Ríos. El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar (DCA) con un arreglo factorial A × B en condiciones de invernadero. El factor A correspondió a los inoculantes micorrízicos *Glomus* (I1), *Acaulospora* (I2) y *Gigaspora* (I3), mientras que el factor B representó las concentraciones totales añadidas al sustrato de metales pesados, específicamente plomo (Pb) y aluminio (Al). Se establecieron los siguientes tratamientos: 20 mg kg⁻¹ de Pb + 400 mg kg⁻¹ de Al (C1), 30 mg kg⁻¹ de Pb + 500 mg kg⁻¹ de Al (C2), 40 mg kg⁻¹ de Pb + 600 mg kg⁻¹ de Al (C3), y un control sin adición de metales (C0). Las concentraciones de Pb y Al fueron aplicadas utilizando nitrato de plomo [Pb(NO₃)₂] y sulfato de aluminio [Al₂(SO₄)₃], respectivamente. La combinación de estos factores generó 12 tratamientos con cuatro repeticiones cada uno, sumando 48 unidades experimentales. Cada unidad consistió en un vaso de 1 L con sustrato esterilizado y 20 semillas de *B. decumbens*, según lo detallado en el Cuadro 1.

Evaluación Morfológica de la Diversidad de Esporas de HMA

Durante el análisis morfológico de las esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA), se llevó a cabo dos procesos simultáneos: el recuento de esporas y su clasificación en morfotipos según sus características, como tamaño, color, ornamentación de la pared, y otra información taxonómica. Para su identificación, cada morfotipo se fijó permanentemente en portaobjetos con polivinil lacto glicerol (PVLG) y una mezcla de PVLG con reactivo Mezler (1:1 v/v). Estos preparados se examinaron con un microscopio compuesto utilizando un objetivo de 40x.

Cuadro 1: Tratamientos con diferentes inoculantes de HMA y concentraciones de Pb y Al en *B. decumbens*.
Table 1: Treatments with different AMF inoculants and Pb and Al concentrations in *B. decumbens*.

Inoculante HMA	Pb	Al	Tratamiento	Repeticiones
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Glomus (I1)	0	0	I1C0	4
	20	400	I1C1	4
	30	500	I1C2	4
	40	600	I1C3	4
Acaulospora (I2)	0	0	I2C0	4
	20	400	I2C1	4
	30	500	I2C2	4
	40	600	I2C3	4
Gigaspora (I3)	0	0	I3C0	4
	20	400	I3C1	4
	30	500	I3C2	4
	40	600	I3C3	4

Evaluación de los Efectos Combinados de Pb y Al en la Respuesta Fisiológica de *Brachiaria decumbens*

Se empleó *B. decumbens* por su rápido crecimiento, su capacidad de formar simbiosis con HMA y su susceptibilidad a la acumulación de Pb y Al. Las semillas se esterilizaron con NaClO al 1 % durante tres minutos y se enjuagaron con agua destilada siguiendo a Lazarotto, Muniz y Santos (2010). El sustrato se preparó con suelo del horizonte A mezclado con turba y perlita (2:1:1) y esterilizado en autoclave a 130 °C durante dos ciclos. En vasos de 1000 cc desinfectados se sembraron 20 semillas por unidad experimental, regadas únicamente con agua destilada esterilizada. A los 15 días se aplicaron los consorcios micorrízicos según los tratamientos, empleando un producto comercial del cual se aislaron y clasificaron morfotipos pertenecientes a tres géneros de HMA (*Glomus*, *Acaulospora* y *Gigaspora*) cuyas dosis de inoculación se presentan en el Cuadro 2. Finalmente, las plantas fueron sometidas a 15 días de estrés hídrico al cierre del ciclo de 90 días para favorecer la esporulación.

Diámetro de Tallo y Altura de la Planta

El diámetro de tallo se midió utilizando un calibrador vernier, tomando registros individuales por cada semilla germinada y calculando posteriormente el promedio correspondiente a cada tratamiento. La altura de la planta se determinó midiendo desde la base (cuello) hasta el extremo superior de la hoja más sobresaliente mediante una cinta métrica, expresando los resultados en centímetros. Ambas mediciones se realizaron a los 15, 30, 45, 60 y 75 días después de haber contaminado.

Peso Húmedo y Seco de la Parte Aérea y Radicular

Se registró el peso húmedo (g) del sistema foliar de plantas de *B. decumbens* de cada tratamiento. Posteriormente, la parte foliar y radicular fue colocada en una estufa a 65 °C durante 72 horas y, finalmente, se registró el peso seco (g) utilizando una balanza de precisión. Las mediciones se realizaron a los 90 días, al finalizar la fase de campo, después de desmontar el experimento.

Longitud Total de Raíces por Planta y Longitud de Raíz por Volumen de Suelo

La longitud total de raíces por planta (RL) se determinó a partir de la medición individual de cada una de las raíces que conformaron el sistema radicular, sumando posteriormente sus longitudes para obtener un valor total por planta, el cual se expresó en centímetros (cm). Este procedimiento permitió una estimación precisa del desarrollo radicular y de la capacidad de exploración del suelo por parte de la planta. El cálculo de la longitud total de raíces se realizó siguiendo la metodología propuesta por Jungk y Claassen (1997), aplicando la siguiente expresión matemática:

$$RL = \frac{\text{Peso fresco raíces por maceta}}{\text{Número de plantas por maceta}} \times RL_s \quad (1)$$

Donde: RL_s corresponde a la longitud específica de la raíz, la cual representa la relación entre la longitud total del sistema radicular y la biomasa radicular, siendo un indicador funcional de la eficiencia de exploración del suelo.

Cuadro 2: Dosis y géneros de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) utilizadas en la inoculación.
Table 2: Doses and genera of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spores used in the inoculation.

Consortio micorrízico	Dosis aplicada
<i>Glomus</i> (I1)	10 esporas/vaso
<i>Acaulospora</i> (I2)	10 esporas/vaso
<i>Gigaspora</i> (I3)	10 esporas/vaso

Adicionalmente, se estimó la longitud de raíz por volumen de suelo (RL_v), parámetro que permite evaluar la densidad radicular y la competencia interradicular por agua y nutrientes dentro del sustrato. Este indicador se expresó en $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ y se calculó considerando el volumen total de suelo explorado por el sistema radicular, mediante la siguiente ecuación:

$$RL_v = \frac{RL \times (\text{número de plantas por macetas})}{\text{Volumen de suelo} \div \text{densidad de suelo}} \quad (2)$$

Extracción y Evaluación de Densidad de Esporas de HMA

Se siguió el método de tamizado en húmedo propuesto por Gerdemann y Nicolson (1963), modificado para adaptarse al contexto de la investigación. Para la preparación de la muestra, se mezclaron 500 mL de agua esterilizada con 0.05 kg de suelo proveniente del experimento, agitando la solución durante 10 segundos para facilitar la disgregación de los terrones y la decantación del material; este proceso se repitió tres veces. Luego, se realizó un tamizado secuencial utilizando mallas de 450, 250, 90 y 75 μm , y el material atrapado en el último tamiz se vertió en frascos con 40 a 50 mL de agua destilada.

Posteriormente, el material retenido se transfirió a tubos de ensayo para aplicar un proceso de centrifugación con gradiente de sacarosa, añadiendo 3 mL de sacarosa al 20% y posteriormente 3 mL de sacarosa al 60 % en el fondo para formar el gradiente; a continuación, se agregaron 4 mL del material del suelo y se centrifugó a 3000 rpm durante 3 minutos. El sobrenadante obtenido se depositó en un tamiz de 75 μm y se lavó con agua destilada estéril para eliminar el exceso de sacarosa. El contenido del tamiz se recogió en recipientes de vidrio y se vertió en cajas Petri para proceder al recuento de esporas mediante micropipeta y estereoscopio. En las 48 unidades experimentales se realizó un recuento individual de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA); para ello, se extrajeron esporas a partir de 50 g de suelo mediante centrifugación y tamizado, permitiendo obtener información detallada sobre la densidad de esporas presentes.

Tinción y Evaluación de Micorrización Radicular

Para evaluar la acumulación de metales en *B. decumbens*, se recolectaron muestras de tejido foliar de cada tratamiento, las cuales fueron lavadas, secadas y molidas para los análisis fisicoquímicos destinados a determinar la concentración de Pb y Al. La micorrización radicular se evaluó mediante el método de tinción descrito por Phillips y Hayman (1970). Las raíces se cortaron en fragmentos de 2 cm, se lavaron cuidadosamente y se sometieron a hidrólisis en KOH al 10% en baño María a 90 °C por 15 minutos. En raíces con pigmentación intensa se aplicó un blanqueo adicional con peróxido de hidrógeno e hidróxido de potasio durante 20 minutos. Posteriormente, se acidificaron con HCl al 37% por 10 minutos y se tiñeron en una solución de ácido láctico con azul tripano al 0.05% durante 15 minutos. Tras el lavado, las muestras se colocaron en lactoglicerol al 50% durante 12 horas para eliminar el exceso de colorante. La colonización se determinó mediante montajes microscópicos con segmentos de 1 cm, cuantificando la presencia de vesículas, arbusculos, hifas y pelos radicales conforme a la escala propuesta por Herrera-Peraza, Furrázola, Ferrer, Valle y Arias (2004), tal como se observa en la Figura 1.

Análisis Estadístico y Determinación de Metales Pesados

El análisis estadístico se realizó en el software RStudio (R Core Team, 2025), aplicando un análisis de varianza (ANOVA) de dos vías para evaluar los efectos de los inoculantes micorrízicos, las concentraciones de Pb y Al, y su interacción. Para la variable altura se utilizó un modelo multifactorial con sumas de cuadrados tipo III. La normalidad y homogeneidad de varianzas se verificaron mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente; cuando estos supuestos no se cumplieron, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey HSD, considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Asimismo, se aplicó un análisis de correlación de Pearson para evaluar la relación entre la biomasa vegetal y la acumulación de metales pesados, y un Análisis de Componentes Principales (PCA) para identificar patrones multivariados entre la colonización micorrízica, las variables fisiológicas y los contenidos de Pb y Al. La determinación de las concentraciones de Pb y Al en las muestras de suelo y tejido vegetal se realizó mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS), siguiendo los protocolos analíticos estándar, lo que garantizó la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

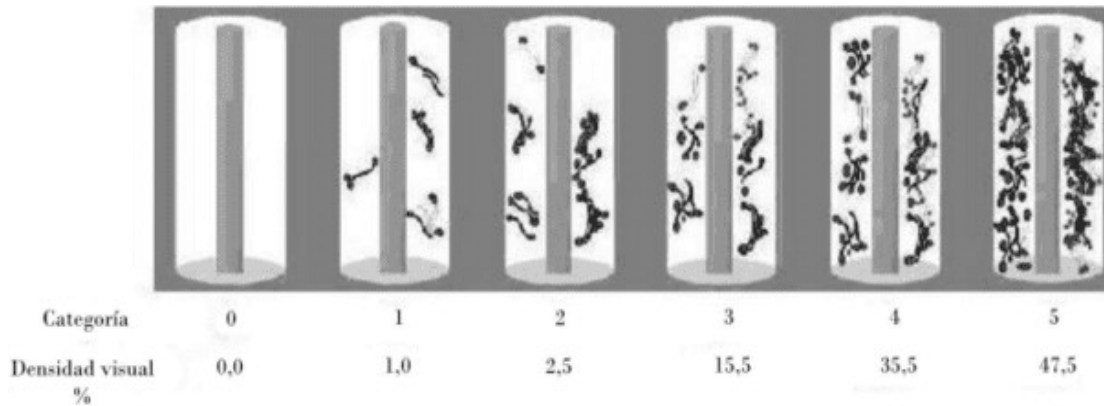


Figura 1: Identificación de estructuras micorrízicas. Se muestran seis niveles de colonización micorrízica arbuscular (categorías de 0 a 5), basados en la cantidad y distribución de estructuras fúngicas observadas bajo el microscopio. La densidad visual (%) representa una estimación porcentual de la colonización, desde ausencia (0%) hasta una colonización alta (47.5%).

Figure 1: Identification of mycorrhizal structures. Six levels of arbuscular mycorrhizal colonization are shown (categories 0 to 5), based on the quantity and distribution of fungal structures observed under the microscope. The visual density (%) represents a percentage-based estimate of colonization, ranging from absence (0%) to high colonization (47.5%).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación Morfológica de Esporas de HMA

El análisis morfológico de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) evidenció una diversidad representativa distribuida en tres familias, Glomeraceae, Acaulosporaceae y Gigasporaceae, de acuerdo con los criterios taxonómicos y descriptores morfológicos de la Colección Internacional de Hongos Micorrízicos Arbusculares (INVAM, 2024). La familia Glomeraceae presentó la mayor diversidad, con la identificación de *Glomus hoi*, *G. macrocarpum*, *G. multicaule*, dos morfotipos indeterminados (*Glomus* sp. 1 y *Glomus* sp. 2) y *Sclerocystis sinuosum*, predominando esporas de formas subglobosas a globosas, con coloraciones que variaron de marrón claro a naranja. En *Acaulosporaceae* se registraron tres morfoespecies del género *Acaulospora* (sp. 1 y sp. 2) y *Acaulospora colombiana*, con esporas redondeadas o globosas y tonalidades entre anaranjado y amarillo oscuro. En la familia Gigasporaceae se identificó *Gigaspora albida*, especie reportada por su tolerancia a metales pesados y su capacidad para establecer simbiosis eficientes bajo condiciones de estrés ambiental.

Las esporas observadas presentaron formas globosas y subglobosas, con coloración predominantemente crema; sin embargo, en algunos casos se registró una tonalidad marrón oscuro, asociada a procesos de parasitismo, de acuerdo con lo descrito en la literatura especializada para ambientes contaminados. Las esporas que presentaron signos evidentes de parasitismo fueron evaluadas morfológicamente, pero no fueron consideradas en el recuento total de densidad ni utilizadas como inóculo viable, a fin de evitar sesgos en la interpretación de la efectividad simbiótica. Estos patrones se ilustran en la Figura 2 donde se detallan forma y color por taxón. Estos hallazgos son consistentes con estudios recientes en agroecosistemas tropicales, donde se reporta que estos géneros son los más representativos y se asocian a la capacidad de mejorar la absorción de fósforo y tolerar condiciones edáficas adversas (van Der Heijden, Martin, Selosse y Sanders, 2015; Öpik et al., 2013).

Diámetro de Tallo por Tratamiento

La Figura 3 muestra un diagrama de cajas para el diámetro de tallo en función de las dosis de contaminación con Pb y Al recibidas, se evidencia la variabilidad de respuesta de *B. decumbens* a los distintos tratamientos. En general, los tratamientos control (I1_C0, I2_C0 e I3_C0) presentan medianas de diámetro mayores y una dispersión relativamente amplia, lo que confirma que la ausencia de contaminación con Pb y Al permite un desarrollo radicular y aéreo más robusto cuando existe inoculación con HMA. En contraste, el consorcio I2 (*Acaulospora*) presentó una mayor variabilidad en los valores de crecimiento del tallo, destacándose el tratamiento I2_C3, el cual alcanzó una mediana superior a 1,6 cm, superando incluso al tratamiento control sin metales.

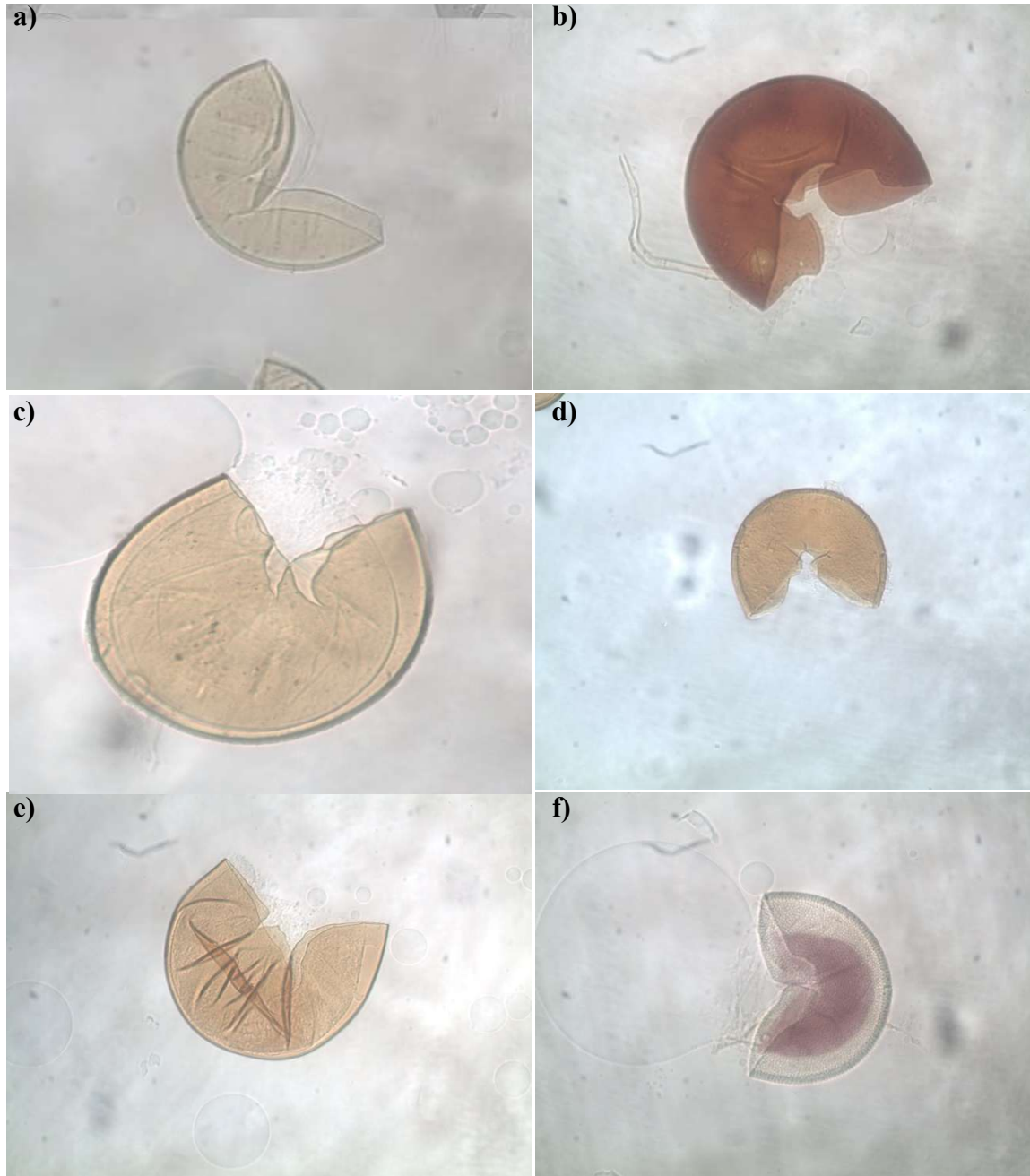


Figura 2. Esporas representativas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). a) *Glomus hoi*; b) *Glomus macrocarpum*; c) *Acaulospora colombiana*; d) *Acaulospora* sp.2; f) *Gigaspora Albida*.

Figure 2: Representative spores of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). a) *Glomus hoi*; b) *Glomus macrocarpum*; c) *Acaulospora colombiana*; d) *Acaulospora* sp.1 e) *Acaulospora* sp.2; f) *Gigaspora Albida*.

Este incremento podría estar asociado a una respuesta adaptativa inducida por niveles moderados de Pb y Al, en la que la simbiosis con *Acaulospora* favorecería mecanismos de tolerancia al estrés, tales como una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes y la regulación del crecimiento vegetal, generando un efecto estimulante sobre el desarrollo del tallo bajo condiciones de contaminación intermedia. Dentro de los tratamientos con contaminación, se observa que en el consorcio I1 (*Glomus*) los diámetros se mantienen en rangos intermedios (1.3-1.5 cm) aun con incrementos de metales, lo que sugiere una mayor capacidad de este consorcio para mitigar el estrés.

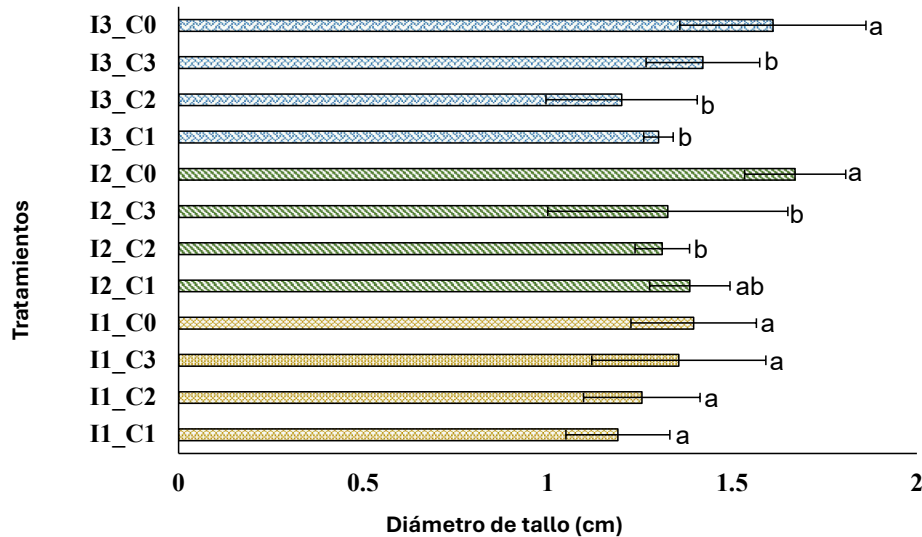


Figura 3. Diámetro de tallo (cm) por tratamientos. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Figure 3. Stem diameter (cm) by treatments. Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

Por otro lado, el consorcio I3 (*Gigaspora*) refleja las menores medianas, especialmente en I3_C2 e I3_C3, donde los diámetros se concentran entre 1.1 y 1.3 cm, indicando que este inoculante no logra compensar adecuadamente el estrés generado por los mayores niveles de Pb y Al. Además, se observan outliers (puntos fuera de rango) en varios tratamientos, señalando la existencia de plantas con comportamientos atípicos, ya sea con mayor tolerancia o sensibilidad. En términos generales, los datos sugieren que el desempeño en diámetro de tallo se ve afectado negativamente por el aumento de metales pesados, pero el efecto se modula según el consorcio micorrízico. I2_C3 se destaca como el tratamiento con mayor mediana de diámetro de tallo bajo contaminación, mientras que I3_C2 e I3_C3 son los más limitados. Esto respalda que la selección del tipo de HMA es determinante para optimizar la tolerancia de *B. decumbens* en suelos con Pb y Al.

Altura de planta (interacción dosis × tiempo)

El análisis de varianza para la altura de las plantas evidenció diferencias significativas tanto para el factor dosis ($p = 0.0471$) como para la temporalidad ($p = 0.0000$), siendo este último el de mayor peso sobre la variable evaluada. En el Cuadro 3 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para esta variable. En contraste, la interacción dosis × temporalidad no resultó significativa ($p = 0.8795$), lo que indica que el efecto de las dosis fue constante a lo largo de las evaluaciones, sin modificar su comportamiento en función del tiempo. Este patrón coincide con lo señalado por Begum et al. (2019), quienes destacan que una colonización micorrízica eficiente y sostenida es esencial para mantener un crecimiento prolongado bajo condiciones de estrés.

La Figura 4 muestra un incremento progresivo y sostenido en la altura de *B. decumbens* a lo largo de las evaluaciones temporales realizadas bajo condiciones controladas. A los 15 días las plantas presentan alturas entre 30 y 40 cm, evidenciando un crecimiento inicial homogéneo. Para los 30 días se observa un aumento marcado, con valores centrales alrededor de 60 cm y una mayor variabilidad entre repeticiones, lo que indica un ritmo de crecimiento más activo. Al alcanzar los 45 días, la altura promedio se sitúa cerca de 70–75 cm, manteniendo una distribución más estable y confirmando la capacidad de la especie para sostener un desarrollo vertical constante. En las evaluaciones posteriores, a los 60 y 75 días, las plantas alcanzan sus mayores dimensiones, con medianas superiores a 90 cm y valores máximos que se aproximan o superan los 100 cm, reflejando que el crecimiento no se detuvo durante el periodo estudiado.

La tendencia ascendente en todos los puntos de evaluación indica que las condiciones del ensayo y la interacción con los HMA permitieron a *B. decumbens* mantener su potencial de crecimiento en altura, incluso bajo las concentraciones de Pb y Al establecidas, sin presentar signos de estrés que limitaran su desarrollo.

Cuadro 3. Análisis de varianza (ANOVA) de la altura de *B. decumbens* bajo diferentes dosis y temporalidad de evaluación.
Table 3. Analysis of variance (ANOVA) of *B. decumbens* height under different doses and evaluation times.

Factores	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Dosis	0.088 557 1	11	0.008 050 65	1.86	0.047 1
B: Temporalidad	30.810 3	4	7.702 58	1781.06	0.000 0
Interacción A × B	0.140 932	44	0.003 203 01	0.74	0.879 5
Residuos	0.778 448	180	0.004 324 71	-	-
Total	31.818 3	239	-	-	-

Estos resultados coinciden con lo reportado por Alotaibi *et al.* (2021) quienes documentan que consorcios de *Acaulospora* pueden promover un crecimiento vegetativo más robusto en ambientes con estrés por metales pesados, principalmente mediante una absorción más eficiente de fósforo, la regulación del estado hídrico y la activación de mecanismos antioxidantes que fortalecen la tolerancia de las plantas.

Peso Húmedo Foliar

El análisis muestra una respuesta diferenciada de *B. decumbens* al tipo de consorcio micorrízico y a los niveles de Pb y Al. Los tratamientos sin contaminación (I1_C0, I2_C0 e I3_C0) exhiben los mayores valores de peso foliar húmedo, entre 25 y 27 g, lo que evidencia condiciones favorables para la acumulación de biomasa cuando la simbiosis no está sometida a estrés metálico. El comportamiento del consorcio I2 (*Acaulospora*) destaca por mantener valores elevados aún bajo las mayores concentraciones de metales, alcanzando en I2_C3 una media cercana a 27-28 g, lo que sugiere una mayor eficiencia funcional para sostener procesos de asimilación y translocación de nutrientes bajo condiciones adversas. Por su parte, el consorcio I3 (*Gigaspora*) muestra un patrón intermedio, con medias en torno a 25 g en el control y ligeras reducciones en tratamientos con metales. En contraste, en el consorcio I1 (*Glomus*), el incremento de las concentraciones de metales genera un descenso progresivo en la respuesta foliar, observándose medias que se ubican entre 22 y 24 g en I1_C1, I1_C2 e I1_C3, lo cual refleja una menor capacidad de atenuación frente a la toxicidad. Estos resultados confirman que la respuesta fisiológica de *B. decumbens* está modulada por el tipo de HMA empleado, siendo el consorcio de *Acaulospora* el que mejor sostiene la producción foliar frente al estrés por Pb y Al (Figura 5). Además, Wu *et al.* (2023) señalan que la tolerancia al Al puede mantenerse incluso con altos niveles de acumulación foliar cuando existen rutas antioxidantes activas y mecanismos eficaces de secuestro, lo que respalda el comportamiento observado en este estudio.

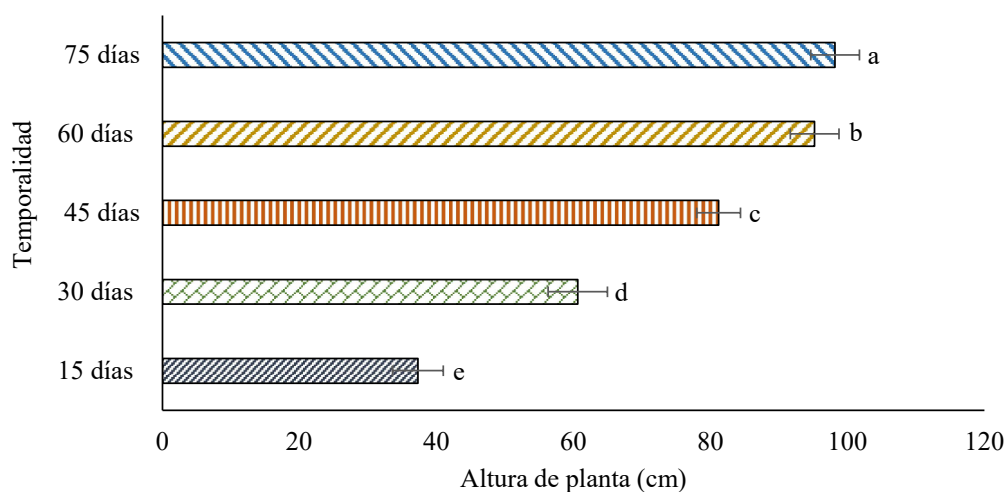


Figura 4. Altura de planta (cm) en función de la temporalidad.
Figure 4. Plant height (cm) as a function of time.

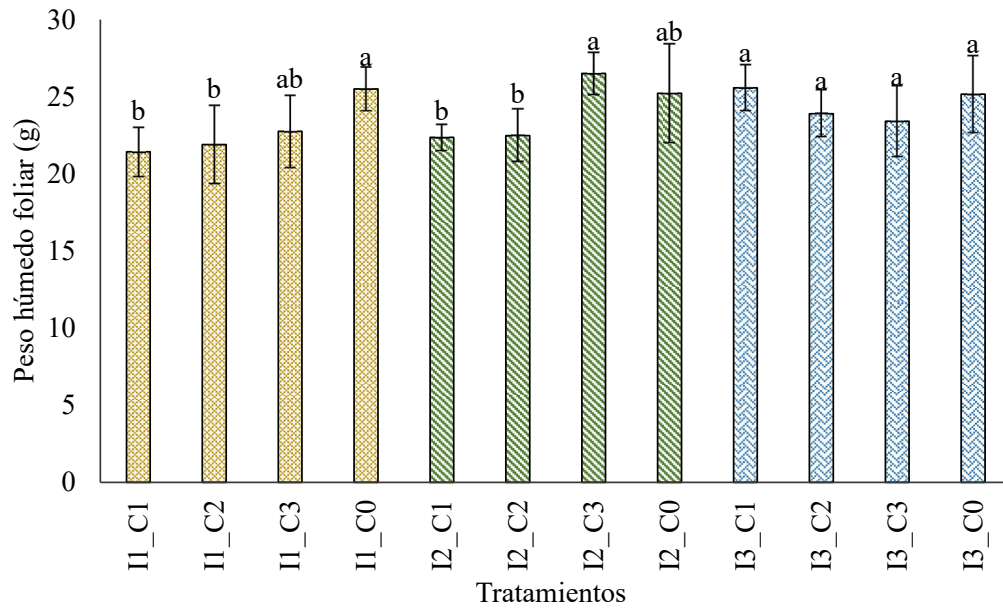


Figura 5. Peso húmedo foliar (g) y tratamientos (IC 95%, Tukey HSD). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Figure 5. Leaf fresh weight (g) by treatments (95% CI, Tukey HSD). Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

Peso Seco Foliar (g)

Para esta variable se evidencian diferenciaciones significativas en la acumulación de biomasa seca foliar según el tipo de consorcio micorrízico y el nivel de exposición a Pb y Al (Figura 6). Los tratamientos control (I1_C0, I2_C0 e I3_C0) presentan las medias más elevadas, cercanas a 16-17 g, confirmando que en ausencia de estrés metálico los HMA favorecen un desarrollo óptimo del tejido foliar. El consorcio I2 (*Acaulospora*) mantiene y aun mejora la acumulación de biomasa seca foliar a medida que se incrementan las dosis de metales, alcanzando en I2_C3 una media próxima a 17-18 g, lo que demuestra una mayor eficiencia fisiológica para tolerar y compensar el estrés por Pb y Al.

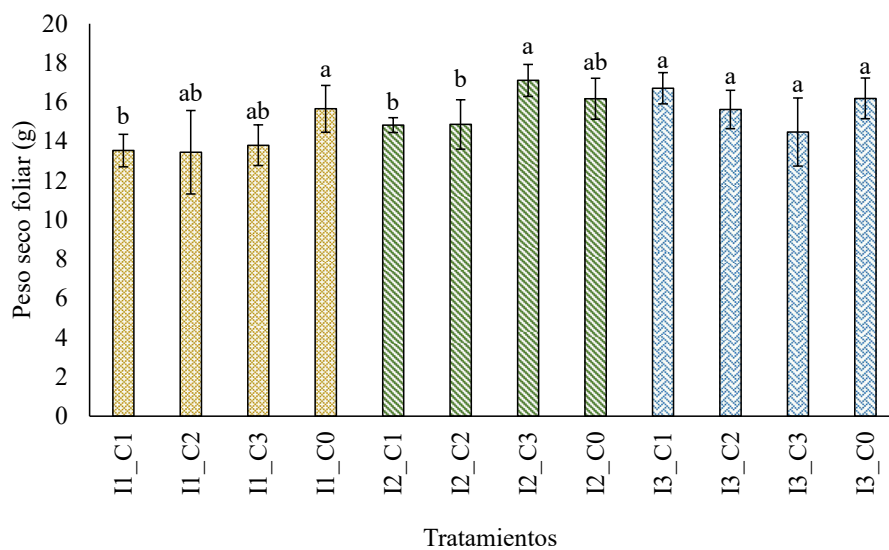


Figura 6. Peso seco foliar (g) y tratamientos (IC 95%, Tukey HSD). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Figure 6. Leaf dry weight (g) by treatments (95% CI, Tukey HSD). Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

El consorcio I3 (*Gigaspora*) muestra un comportamiento intermedio, con valores elevados en el control y una respuesta estable frente a las dosis crecientes de metales, sin reducciones notables. En el consorcio I1 (*Glomus*), el aumento de las concentraciones de metales ocasiona una reducción progresiva del peso seco, observándose valores mínimos en I1_C2 e I1_C3 alrededor de 13-14 g, lo que refleja una menor capacidad de adaptación de este consorcio bajo condiciones adversas. Las letras superíndices confirman diferencias estadísticas entre tratamientos, destacando la superioridad de *Acaulospora* en la conservación de biomasa seca foliar bajo condiciones de contaminación. En general, los resultados evidencian que la resiliencia en la producción foliar de *B. decumbens* depende del consorcio micorrízico, siendo *Acaulospora* el más eficaz en ambientes con Pb y Al.

Longitud de Raíz

El comportamiento del largo de raíz muestra diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, tanto al consorcio micorrízico como al nivel de exposición a metales (Figura 7). Los consorcios I2 (*Acaulospora*) e I3 (*Gigaspora*) muestran un desempeño superior, con medias de largo de raíz que oscilan entre 38 y 50 cm a pesar de las dosis crecientes de metales, destacando I3_C2 con valores máximos cercanos a 50 cm. En el consorcio I1 (*Glomus*), el tratamiento control (I1_C0) registra valores cercanos a 40 cm, mientras que con el incremento de la dosis metálica se observa una reducción marcada, alcanzando valores mínimos en I1_C1 alrededor de 25 cm, para luego recuperarse parcialmente en I1_C2 e I1_C3. Este patrón sugiere que la respuesta radicular inicial ante Pb y Al es de sensibilidad, aunque con cierta capacidad

de ajuste en concentraciones intermedias y altas. Esta tendencia indica que ambos consorcios, particularmente *Gigaspora*, favorecen un desarrollo radicular más extenso incluso bajo estrés químico, lo que se traduce en una mayor exploración del perfil edáfico y una capacidad de tolerancia superior frente a la presencia de Pb y Al. Estos resultados coinciden con lo reportado por Pawlowska y Charvat (2004), quienes señalan la capacidad de ciertos HMA para inmovilizar metales en la raíz y reducir su transporte hacia los tejidos aéreos, fortaleciendo así la tolerancia general de la planta.

Densidad y Conteo de Esporas

El análisis de las 48 unidades experimentales permitió cuantificar la densidad de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) recuperadas del sustrato. En general, se observó que los tratamientos control (I1_C0, I2_C0 e I3_C0) presentaron las mayores densidades, con valores superiores a 200 esporas·50 g⁻¹ de suelo, lo que refleja condiciones favorables para la persistencia de propágulos en ausencia de estrés metálico. A medida que se incrementaron las concentraciones de Pb y Al en el suelo, la densidad de esporas tendió a disminuir de forma significativa ($p < 0,05$), aunque el patrón de reducción varió según el consorcio micorrízico evaluado.

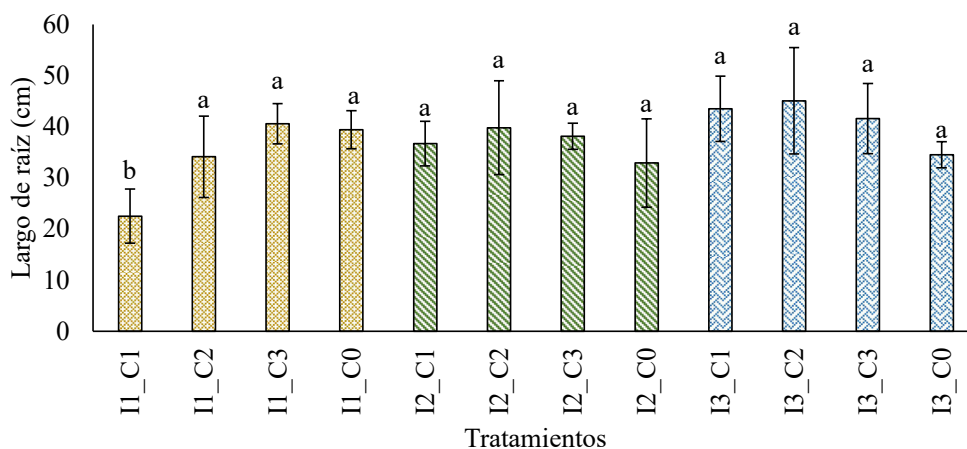


Figura 7. Longitud de raíz (cm) y tratamientos (IC 95%, Tukey HSD). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Figure 7. Root length (cm) by treatments (95% CI, Tukey HSD). Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

El consorcio I2 (*Acaulospora*) mostró la mejor capacidad, manteniendo entre 120 y 150 esporas·50 g⁻¹ incluso bajo la dosis máxima (C3), el consorcio I3 (*Gigaspora*) exhibió un comportamiento intermedio, con densidades promedio de 100-110 esporas·50 g⁻¹ bajo las dosis elevadas mientras que el consorcio I1 (*Glomus*) presentó una reducción más drástica, con valores cercanos a 80 esporas·50 g⁻¹ en I1_C3 (Cuadro 4). Estos resultados se alinean con lo señalado por Mirzaei y Moradi (2017), quienes indican que la biodiversidad del conjunto de HMA influye directamente en la capacidad total de fitorremediación, lo que explicaría la mayor estabilidad del consorcio I3 frente al incremento de metales.

Contenido de Plomo en Tejido de *B. decumbens*

La Figura 8 muestra que la acumulación de Pb en los tejidos de *B. decumbens* varió significativamente según el consorcio micorrízico y la dosis de exposición. Las letras de significancia confirman diferencias estadísticas entre tratamientos, con los controles siempre en el grupo más bajo (*d*) y las dosis más altas de I1 e I2 en el grupo superior (*a*). En los tratamientos control (I1_C0, I2_C0 e I3_C0), los niveles se mantuvieron bajos (3 a 4 mg kg⁻¹), confirmando la ausencia de translocación del metal en condiciones sin contaminación. En el consorcio I1 (*Glomus*), se observó un incremento progresivo con el aumento de la dosis, alcanzando en I1_C3 el valor máximo (28 mg kg⁻¹), lo que refleja una mayor translocación de Pb hacia los tejidos aéreos bajo este inoculante. De manera similar, el consorcio I2 (*Acaulospora*) también presentó elevadas concentraciones en las dosis más altas, destacando I2_C3 con valores cercanos a 28 mg kg⁻¹, aunque con un patrón de acumulación más gradual. Por el contrario, el consorcio I3 (*Gigaspora*) evidenció niveles intermedios, entre 13 y 18 mg kg⁻¹, mostrando una menor acumulación en comparación con I1 e I2.

Contenido de Aluminio en Tejido de *B. decumbens*

La Figura 9 muestra que la acumulación de Al en los tejidos de *B. decumbens* que difirió significativamente entre consorcios micorrízicos y niveles de exposición. A través de las letras se confirma las variaciones entre tratamientos, con incrementos estadísticamente consistentes desde C1 hasta C3. En los tratamientos controles (I1_C0, I2_C0 e I3_C0) se registraron las concentraciones más bajas, en torno a 40-50 mg kg⁻¹, lo que confirma que en ausencia de aporte externo la planta mantiene niveles basales mínimos. Con el incremento de las dosis de Al, los tres consorcios mostraron un patrón ascendente: en *Glomus* (I1), la acumulación aumentó progresivamente hasta alcanzar en I1_C3 valores cercanos a 420 mg kg⁻¹, lo que evidencia una marcada translocación hacia los tejidos foliares. En *Acaulospora* (I2) se observó una tendencia similar, con un máximo también en I2_C3 (410 mg kg⁻¹), confirmando su capacidad de captar y movilizar Al en condiciones de estrés. En contraste, el consorcio *Gigaspora* (I3) mostró un comportamiento diferenciado, aunque los niveles aumentaron con C1 y C2, en C3 se mantuvieron en valores intermedios (230 a 250 mg kg⁻¹), significativamente menores que I1 e I2 a la misma dosis.

Colonización Micorrízica

La colonización micorrízica en *B. decumbens* presentó un comportamiento diferenciado según el tipo de hongo inoculado y las concentraciones de Pb y Al aplicadas (Figura 10). En el caso de *Glomus*, el mayor porcentaje de colonización se registró en el control sin metales (I1_C0, 35 %), mientras que a concentraciones crecientes de Pb y Al se observó una reducción progresiva, alcanzando el valor más bajo en I1_C3 (15 %), lo que evidencia su

Cuadro 4. Densidad promedio de esporas de HMA (esporas·50 g⁻¹ de suelo) en función del consorcio inoculado y los niveles de Pb y Al. Table 4. Mean AMF spore density (spores·50 g⁻¹ soil) as a function of the inoculated consortium and Pb and Al levels.

Consorcio	C0 (0 Pb-0 Al)	C1 (20 Pb-400 Al)	C2 (30 Pb-500 Al)	C3 (40 Pb-600 Al)
I1-Glomus	210 ± 15 a	160 ± 12 b	120 ± 10 c	80 ± 9 d
I2-Acaulospora	230 ± 18 a	190 ± 14 b	160 ± 11 b	140 ± 13 c
I3-Gigaspora	220 ± 17 a	170 ± 13 b	130 ± 12 c	110 ± 10 c

[†] Valores expresados como media ± DE. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas según Tukey HSD ($p < 0.05$).

[†] Values are expressed as mean ± SD. Different letters within the same row indicate significant differences according to Tukey HSD ($p < 0.05$).

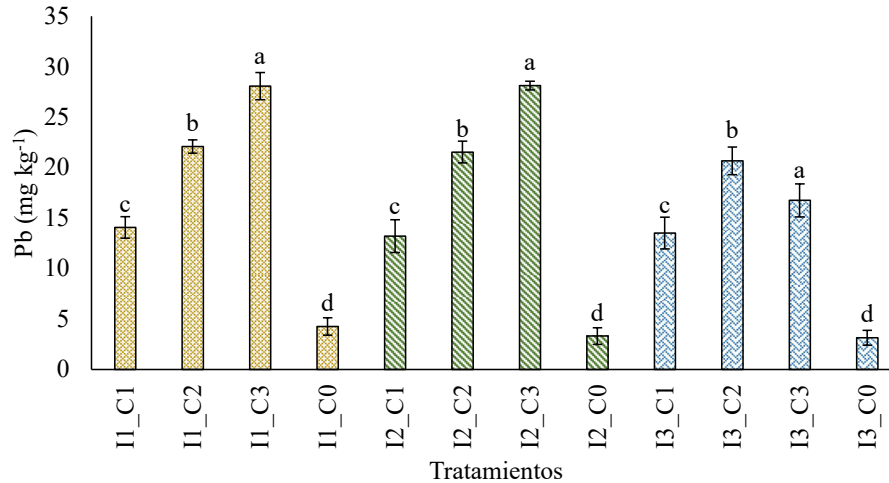


Figura 8. Contenido de Pb en tejido (g cm⁻³) por tratamientos (IC 95%, Tukey HSD). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).
Figure 8. Pb content in plant tissue (g cm⁻³) by treatments (95% CI, Tukey HSD). Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

sensibilidad al estrés metálico. Por su parte, *Acaulospora* mostró un patrón contrastante: los tratamientos con concentraciones bajas y medias (I2_C1 e I2_C2) presentaron los mayores porcentajes de colonización (25 %), mientras que el control (I2_C0) y la mayor concentración (I2_C3) registraron valores menores (15–20 %). Este comportamiento sugiere que niveles moderados de metales podrían inducir una activación de la simbiosis micorrízica como mecanismo de respuesta al estrés por parte de la planta, o bien que el género *Acaulospora* presenta una mayor eficiencia colonizadora bajo condiciones de estrés moderado, como ha sido reportado para suelos contaminados con metales pesados (Leyval, Turnau y Haselwandter, 1997; Hildebrandt, Regvar y Bothe, 2007). En contraste, *Gigaspora* alcanzó la mayor colonización en el control (I3_C0, 35 %), pero evidenció un descenso marcado conforme aumentaron las concentraciones metálicas, con reducciones hasta 10 % en I3_C3, lo que indica una relación inversa entre el grado de contaminación y la intensidad de la simbiosis.

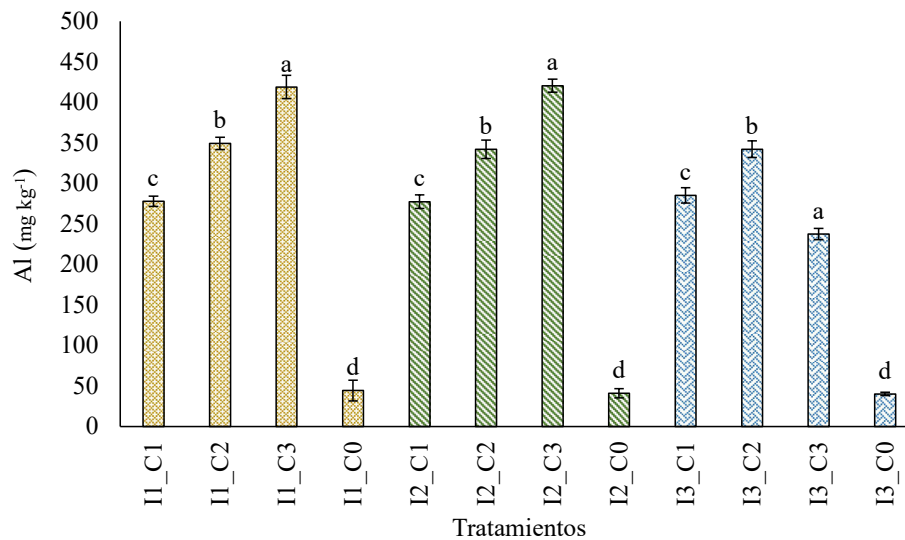


Figura 9. Contenido de Al en tejido (g cm⁻³) por tratamientos (IC 95%, Tukey HSD). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas, según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).
Figure 9. Al content in plant tissue (g cm⁻³) by treatments (95% CI, Tukey HSD). Different letters indicate statistically significant differences according to Tukey's test ($p < 0.05$).

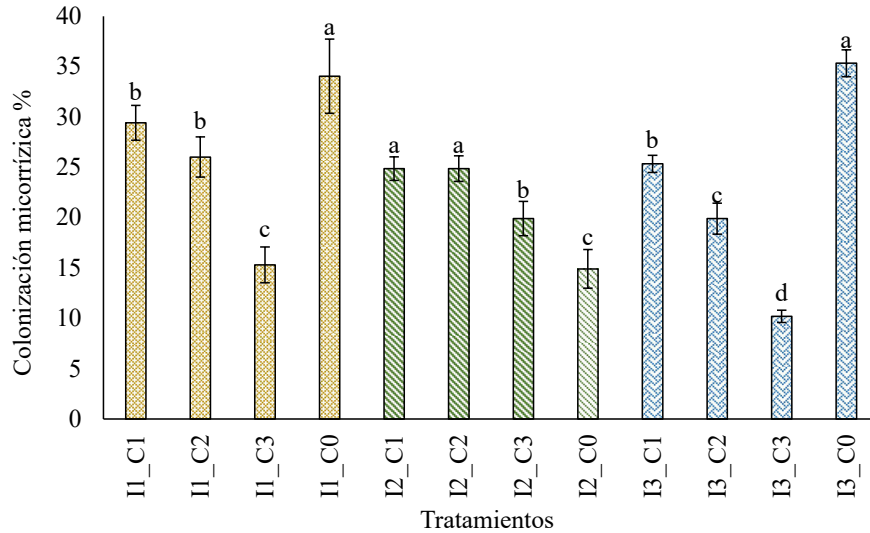


Figura 10. Porcentaje de colonización micorrizica de *Glomus*, *Acaulospora*, *Gigaspora* en raíces de *B. decumbens* bajo los diferentes tratamientos de Pb y Al.

Figure 10. Percentage of mycorrhizal colonization by *Glomus*, *Acaulospora*, and *Gigaspora* in *B. decumbens* roots under different Pb and Al treatments.

Análisis de Componentes Principales (PCA)

El Componente 1, que explica la mayor proporción de varianza, está fuertemente asociado con las variables Pb, Al, PHR (g) y LR (cm) en el lado positivo del eje. Esto sugiere que estas variables covarían positivamente y contribuyen significativamente a la primera dimensión de variabilidad. Específicamente, una mayor concentración de Plomo (Pb) y Aluminio (Al) tiende a estar correlacionada con un mayor Peso Húmedo de Raíz (PHR) y Largo de Raíz (LR). Esta observación es particularmente interesante, ya que podría indicar una respuesta fisiológica o de adaptación de la planta a la presencia de metales pesados, donde un mayor desarrollo radicular podría ser una estrategia para la exploración de nutrientes o la mitigación del estrés (Figura 11).

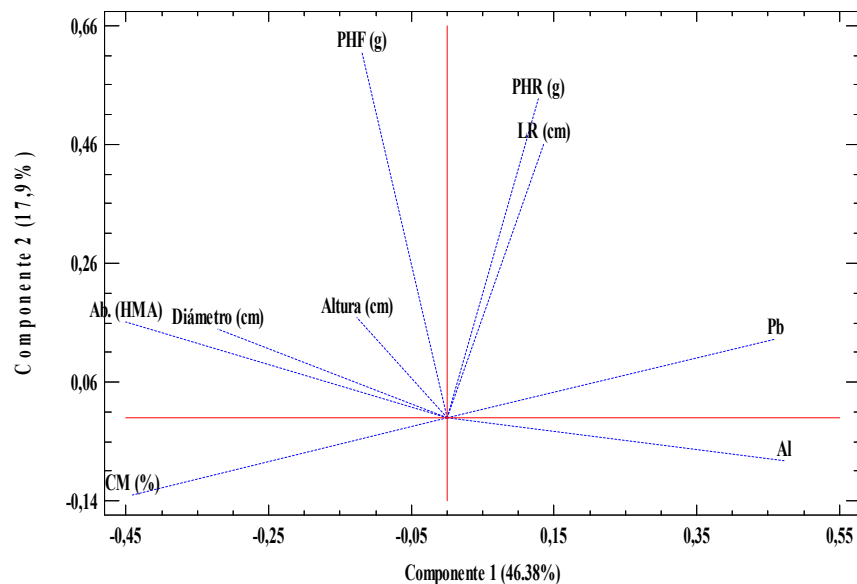


Figura 11. Biplot del PCA integrando colonización, biomasa y metales. Distribución de variables y tratamientos; vectores indican contribuciones y sentido de asociación.

Figure 11. PCA biplot integrating colonization, biomass, and metals. Distribution of variables and treatments; vectors.

En el lado negativo del Componente 1, se observan variables como Ab. (HMA), Diámetro (cm) y CM (%). Esto implica una correlación inversa con las variables del lado positivo. Es decir, a medida que aumentan la abundancia de HMA, el diámetro del tallo y el porcentaje de colonización micorrízica, tienden a disminuir las concentraciones de Pb y Al, así como el PHR y LR. Esta relación es crucial en el contexto de estudios de micorrizas y metales pesados. Sugiere que la presencia y actividad de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), reflejada en la abundancia y la colonización, se asocia con una menor acumulación de metales pesados o con un mejor desempeño de la planta bajo estas condiciones de estrés, posiblemente a través de mecanismos de exclusión, inmovilización o fitorremediación asistida por micorrizas.

El análisis de componentes principales integró todas las observaciones y evidenció una relación negativa entre la acumulación de metales y las variables de biomasa y colonización, en concordancia con lo reportado por Hernández-Ortega *et al.* (2012). El Componente 2, aunque explicó una menor proporción de la varianza, aportó información relevante sobre las interacciones funcionales entre las variables: la biomasa foliar (PHF) y la altura de la planta mostraron fuertes cargas positivas, indicando una variación conjunta y coherente con patrones de crecimiento aéreo, mientras que la colonización micorrízica (CM %) se ubicó en el eje negativo, con una carga menor, lo que sugiere una relación más compleja y multidimensional en esta segunda dimensión. Esta disposición es consistente con la interpretación de Freschet, Swart y Cornelissen (2015), quienes señalan que la biomasa foliar y la longitud radicular pueden agruparse como respuestas sinérgicas en contextos de simbiosis funcional. Asimismo, el diámetro presentó una ligera carga negativa, reflejando tendencias similares a CM %, lo que indica que, en este eje, la colonización y algunos atributos estructurales podrían no estar directamente alineados con los incrementos en biomasa aérea, sino modulados por otros factores fisiológicos y edáficos.

CONCLUSIONES

La caracterización morfológica permitió una identificación confiable de los hongos micorrízicos arbusculares presentes en los aislamientos. La exposición combinada a Pb y Al mostró que el consorcio micorrízico I2 (*Acaulospora*) mantuvo la biomasa y el diámetro foliar de *B. decumbens* cerca de los niveles de control, evidenciando que su capacidad de sostener colonización funcional permite una simbiosis efectiva y contribuye a la tolerancia de la planta frente a la toxicidad metálica. La simbiosis con HMA moduló la respuesta al estrés metálico, *Acaulospora* mostró mayor tolerancia, *Glomus* incrementó la translocación de metales y *Gigaspora* redujo la acumulación foliar, aunque con menor persistencia.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el presente estudio están disponibles a través del autor correspondiente, previa solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia en esta sección.

FINANCIACIÓN

Este proyecto se realizó por financiamiento FOCICYT-2023 (Micorrizas arbusculares y su capacidad micorremediadora de suelos contaminados con metales pesados en la zona central del trópico húmedo ecuatoriano) otorgado por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: O.O.P.B. y H.F.C.M.; Metodología: O.O.P.B. y H.F.C.M.; Investigación: O.O.P.B. y H.F.C.M.; Análisis formal: O.O.P.B., H.F.C.M. y M.N.S.L.; Escritura – revisión y edición: O.O.P.B., F.A.P. y J.L.V.U.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por proveernos de las instalaciones e insumos indispensables para la ejecución de la presente investigación.

LITERATURA CITADA

- Alotaibi, M. O., Saleh, A. M., Sobrinho, R. L., Sheteiwy, M. S., El-Sawah, A. M., Mohammed, A. E., & Elgawad, H. A. (2021). Arbuscular mycorrhizae mitigate aluminum toxicity and regulate proline metabolism in plants grown in acidic soil. *Journal of Fungi*, 7(7), 531. <https://doi.org/10.3390/jof7070531>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., ... & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Chand, S., Indu, Singhal, R. K., & Govindasamy, P. (2022). Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. *Grass and Forage Science*, 77(1), 11-32.
- Freschet, G. T., Swart, E. M., & Cornelissen, J. H. (2015). Integrated plant phenotypic responses to contrasting above and below ground resources: key roles of specific leaf area and root mass fraction. *New Phytologist*, 206(4), 1247-1260. <https://doi.org/10.1111/nph.13352>
- 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)
- Guerra-Sierra, B. E., Muñoz-Guerrero, J., & Sokolski, S. (2021). Phytoremediation of heavy metals in tropical soils an overview. *Sustainability*, 13(5), 2574. <https://doi.org/10.3390/su13052574>
- Guzman, A., Montes, M., Hutchins, L., DeLaCerde, G., Yang, P., Kakouridis, A., ... & Kremen, C. (2021). Crop diversity enriches arbuscular mycorrhizal fungal communities in an intensive agricultural landscape. *New Phytologist*, 231(1), 447-459. <https://doi.org/10.1111/nph.17306>
- Hernández-Ortega, H. A., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., Zavaleta-Mancera, H. A., López-Delgado, H. A., & Mendoza-López, M. R. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient status, and total antioxidant activity of *Melilotus albus* during phytoremediation of a diesel-contaminated substrate. *Journal of Environmental Management*, 95, S319-S324. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.02.015>
- Herrera-Peraza, R. A., Furrázola, E., Ferrer, R. L., Valle, R. F., & Arias, Y. T. (2004). Functional strategies of root hairs and arbuscular mycorrhizae in an evergreen tropical forest, Sierra del Rosario, Cuba. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 35(2), 113-123.
- Hildebrandt, U., Regvar, M., & Bothe, H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68(1), 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.023>
- INVAM (International Culture Collection of (Vesicular) Arbuscular Mycorrhizal Fungi). (2024). *INVAM: International culture collection of arbuscular and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi*. Morgantown, WV, USA: West Virginia University.
- Jungk, A., & Claassen, N. (1997). Ion diffusion in the soil-root system. In A. E. Johnston (Ed.), *Soil and plant nutrition* (pp. 53-110). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Khanum, S., Al-Tawaha, A. R. M., Al-Tawaha, A. R., Alatrash, H., Rauf, A., Karnwal, A., ... & Gunal, E. (2024). Role of AMF in sustainable agriculture. In *Mycorrhizal technology* (pp. 219-236). Boca Raton, FL, USA: Apple Academic Press.
- Lazarotto, M., Muniz, M. F. B., & Santos, Á. F. D. (2010). Detection, transmission, pathogenicity and chemical treatment of fungi in *Ceiba speciosa* seeds. *Summa Phytopathologica*, 36, 134-139. <https://doi.org/10.1590/S0100-54052010000200005>
- Leyval, C., Turnau, K., & Haselwandter, K. (1997). Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza*, 7(3), 139-153. <https://doi.org/10.1007/s005720050174>
- Mirzaei, J., & Moradi, M. (2017). Relationships between flora biodiversity, soil physicochemical properties, and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) diversity in a semi-arid forest. *Plant Ecology and Evolution*, 150(2), 151-159. <https://doi.org/10.5091/plecevo.2017.1249>
- Mohanty, C., & Selvaraj, C. I. (2025). Leveraging plant-based remediation technologies against chromite mining toxicity. *International Journal of Phytoremediation*, 27(2), 192-205. <https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2407908>
- Mutumura, M., & Ghimire, S. (2021). Brachiaria grass for sustainable livestock production in Rwanda under climate change. In W. Leal Filho (Ed.), *Handbook of climate change management: Research, leadership, transformation* (pp. 195-211). Cham, Switzerland: Springer.
- Öpik, M., Zobel, M., Cantero, J. J., Davison, J., Facelli, J. M., Hiiesalu, I., ... & Moora, M. (2013). Global sampling of plant roots expands the described molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 23(5), 411-430.
- Padhiary, M., & Kumar, R. (2024). Assessing the environmental impacts of agriculture, industrial operations, and mining on agro-ecosystems. In *Smart internet of things for environment and healthcare* (pp. 107-126). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70102-3_8
- Pérez-Moncada, U. A., Ramírez-Gómez, M., Serralde-Ordoñez, D. P., Peñaranda-Rolón, A. M., Wilches-Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo-Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- 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), 158-198. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Pawlowska, T. E., & Charvat, I. (2004). Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(11), 6643-6649.
- R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rehman, M., Pan, J., Luo, D., Wang, C., Mubeen, S., & Chen, P. (2025). Kenaf and soybean intercropping affects morpho-physiological attributes, antioxidant capacity and copper uptake in contaminated soil. *Plant and Soil*, 506(1), 227-244. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06271-5>

-
- Valencia, J. A. M. (2025). Innovaciones para una Ganadería Climáticamente Inteligente: Impacto de Suplementos, Genética y Manejo del Estiércol en las Emisiones de GEI. *Ibero Ciencias-Revista Científica y Académica*, 4(2), 662-700.
- van Der Heijden, M. G., Martin, F. M., Selosse, M. A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406-1423.
- Wu, J., Luo, J., Wang, Y., Peng, Y., Yang, G., & Zhu, J. (2023). Arbuscular mycorrhiza augments aluminum tolerance in white clover (*Trifolium repens* L.) by strengthening the ascorbate-glutathione cycle and phosphorus acquisition. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29(11), 1647-1661. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01369-7>
- Zhang, X., Wang, Z., Lu, Y., Wei, J., Qi, S., Wu, B., & Cheng, S. (2024). Sustainable remediation of soil and water utilizing arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Microorganisms*, 12(7), 1255. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12071255>