

## Capacidad Micorremediadora de Inóculos Micorrízicos Arbusculares Frente al Cadmio y su Influencia en el Crecimiento Inicial de *Oryza sativa* Mycoremediation Capacity of Arbuscular Mycorrhizal Inocula Under Cadmium Stress and Their Influence on the Early Growth of *Oryza sativa*

Oscar Oswaldo Prieto-Benavides<sup>1†</sup> , Juan Pablo Urdánigo-Zambrano<sup>2</sup> ,  
José Enrique Nieto-Rodríguez<sup>2</sup> , Samir Antonio Zambrano-Montes<sup>2</sup>  y  
Jeffery Jesús Escobar-Yépez<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Campus Experimental La María, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Ambiental; (O.O.P.B.).

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas; (J.P.U.Z.), (J.E.N.R.), (S.A.Z.M.), (J.J.E.Y.). Vía Quevedo-El Empalme km 7.5, La María. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

† Autor para correspondencia: oprieto@uteq.edu.ec

### RESUMEN

La contaminación de suelos por metales pesados representa un problema crítico para la productividad agrícola y la seguridad alimentaria en regiones tropicales, donde el uso intensivo de insumos químicos incrementa la acumulación de elementos persistentes como el cadmio (Cd). Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) han emergido como una estrategia para favorecer el crecimiento vegetal como para la mitigación y tolerancia al estrés frente a metales pesados. El propósito del estudio se enmarcó en la evaluación del efecto de tres tipos de inóculos micorrízicos (líquido, sólido y del suelo) sobre el crecimiento inicial de *Oryza sativa* expuesta a distintas concentraciones de Cd bajo condiciones controladas de vivero. El experimento se condujo durante 25 días empleando un diseño factorial, evaluándose variables biométricas aéreas y radiculares, así como la capacidad de extracción de Cd. Los datos fueron analizados mediante ANOVA y pruebas de comparación múltiple, y la respuesta de extracción de Cd se evaluó mediante regresión lineal. Los resultados demostraron que el desarrollo de *Oryza sativa* estuvo ligada en función del inóculo micorrízico. El inóculo sólido maximizó el desempeño aéreo, con 18.5 hojas funcionales y las mayores biomásas fresca (2.85 g) a 30 mg kg<sup>-1</sup> de Cd ( $p < 0.05$ ). En contraste, el inóculo del suelo incrementó el desarrollo radicular fresco, alcanzando valores cercanos a 6.0 g bajo la misma concentración de Cd, mientras que el inóculo líquido promovió el mayor diámetro de tallo ( $p < 0.05$ ), aunque con menor acumulación de biomasa. La altura de planta no presentó variaciones significativas entre tratamientos ( $p > 0.05$ ). La extracción de Cd mostró una relación positiva con la concentración del metal, explicando el modelo de regresión el 58.4% de la variabilidad observada ( $R^2$  ajustado = 0.58;  $p = 0.010$ ), con una mayor acumulación en tejidos foliares. Los resultados indican que los HMA modulan el desarrollo fisiológico del arroz ante la presencia de Cd.

**Palabras clave:** contaminación por Cd, micorremediación, montaje experimental, rendimiento agrícola, simbiosis vegetal.

### SUMMARY

Soil contamination by heavy metals represents a critical challenge for agricultural productivity and food security in tropical regions, where the intensive use of chemical inputs increases the accumulation of persistent elements such as cadmium (Cd). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) have emerged as a strategy to enhance plant growth and increase tolerance to heavy metal stress. The aim of this study was to



check for  
updates

#### Cita recomendada:

Prieto-Benavides, O. O., Urdánigo-Zambrano, J. P., Nieto-Rodríguez, J. E., Zambrano-Montes, S. A., & Escobar-Yépez, J. J. (2026). Capacidad Micorremediadora de Inóculos Micorrízicos Arbusculares Frente al Cadmio y su Influencia en el Crecimiento Inicial de *Oryza sativa*. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-14. e2469. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2469>

Recibido: 2 diciembre de 2025.  
Aceptado: 11 de marzo de 2026.  
Artículo. Volumen 44.  
Mayo 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/>).

evaluate the effect of three types of mycorrhizal inocula (liquid, solid, and soil-derived) on the initial growth of *Oryza sativa* L. exposed to different Cd concentrations under controlled nursery conditions. The experiment was conducted over a 25-day period using a factorial design and assessing aboveground and belowground biometric variables, as well as Cd extraction capacity. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and multiple comparison tests, while Cd extraction response was evaluated by linear regression. The results demonstrated a differential response of *O. sativa* depending on the type of mycorrhizal inoculum. The solid inoculum maximized aboveground performance, producing 18.5 functional leaves and the highest fresh biomass (2.85 g) at 30 mg kg<sup>-1</sup> Cd ( $p < 0.05$ ). In contrast, the soil-derived inoculum enhanced fresh root development, reaching values close to 6.0 g at the same Cd concentration, whereas the liquid inoculum promoted the greatest stem diameter ( $p < 0.05$ ), although with lower biomass accumulation. Plant height did not show significant differences among treatments ( $p > 0.05$ ). Cadmium extraction showed a positive relationship with metal concentration, with the regression model explaining 58.4% of the observed variability (adjusted  $R^2 = 0.58$ ;  $p = 0.010$ ), and higher accumulation occurring in foliar tissues. Overall, the results indicate that AMF modulate the physiological response of rice under Cd stress.

**Index words:** Cd contamination, mycoremediation, experimental setup, agricultural yield, plant symbiosis.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por metales pesados en países en vía de desarrollo es un problema ambiental alarmante, impulsado por las actividades antropogénicas que intensifican su acumulación. La agricultura es una de las fuentes de mayor relevancia a causa de la dependencia generalizada a los fertilizantes químicos y pesticidas que han facilitado la acumulación de estos metales persistentes, lo cual dificulta la resiliencia en agroecosistemas y la seguridad alimentaria (Al-Maliki y Al-Shamary, 2022). Deknock *et al.* (2019) destacan que, en regiones tropicales, la aplicación intensiva de pesticidas es una práctica habitual en fincas pequeñas como en cultivos de gran escala. Dicha práctica es una tendencia preocupante que se ve reflejada en Ecuador, donde en 2020 el 56.80% de los cultivos permanentes y el 79% de los cultivos transitorios recibieron tratamientos con insumos químicos para la producción global (INEC, 2021).

La absorción de estos metales por el sistema radicular de los cultivos agrícolas puede comprometer el rendimiento al favorecer su translocación y acumulación en tejidos aéreos e incluso en órganos comestibles (Schommer *et al.*, 2023). Esta acumulación implica severas alteraciones fisiológicas, al reducir la actividad fotosintética, inducir desequilibrios nutricionales, así como alterar las actividades enzimáticas (Tufail *et al.*, 2022). La asimilación de concentraciones elevadas en los sistemas de cultivo incrementa el riesgo de su transferencia entre los diferentes niveles tróficos, favoreciendo procesos de biomagnificación lo cual cuestiona la capacidad de gestión del sector agrícola para garantizar la seguridad alimentaria.

Las numerosas investigaciones que han descrito la magnitud de estos impactos han impulsado la exploración de estrategias de mitigación que superen las limitaciones de los enfoques tradicionales. Hildebrandt, Regvar y Bothe (2007) indagaron en el potencial de las asociaciones simbióticas con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) para modular la dinámica de metales en la rizosfera mediante su inmovilización en hifas y esporas, la liberación de glomalina y ácidos orgánicos que favorecen su adsorción o precipitación, e incluso la modificación del transporte radicular, limitando la translocación de estos elementos hacia tejidos aéreos y órganos comestibles. No obstante, la efectividad de la micorremediación se encuentra ligada a factores como la especie de HMA, las propiedades edáficas, la naturaleza y concentración del metal (Ferro, Tamayo y Vargas, 2016).

A pesar de los avances en el estudio de la micorremediación, la aplicación de estas estrategias de mitigación continúa siendo un campo amplio de investigación, con potencial de desempeño en ecosistemas tropicales (Dixit *et al.*, 2022). En Ecuador, estudios recientes han documentado la presencia y los riesgos asociados a los metales pesados como Cd en sistemas agrícolas, particularmente en los cultivos de arroz (*Oryza sativa*) alertando de la urgencia de estrategias adaptadas localmente (Ochoa *et al.*, 2020; Atiaga, Ruales, Nunes y Otero, 2021).

Sin embargo, no se han reportado estudios que comparen directamente distintas formulaciones de inóculo micorrízico y cuantifiquen respuestas agronómicas y de extracción de Cd en *Oryza sativa*. El presente estudio compara tres tipos de inóculos de HMA (líquido, sólido y del suelo) bajo un gradiente de concentraciones de Cd, empleando dosis diferenciadas definidas en función de la naturaleza y cantidad de propágulos micorrízicos presentes en cada formulación. El inóculo micorrízico comercial en formulación líquida estuvo constituido principalmente por esporas viables de HMA, de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante. En contraste, la formulación sólida consistió en una mezcla de propágulos micorrízicos, incluyendo esporas, hifas fúngicas y fragmentos de raíces colonizadas. De esta manera se pretende generar evidencia experimental que contribuya a comprender cómo la naturaleza de la formulación micorrízica modula la respuesta de *Oryza sativa* frente al estrés por Cd en condiciones controladas de vivero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Microbiología y Biología Molecular, situados en el Campus "La María" de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo ubicado en el kilómetro 7.5 de la vía Quevedo - El Empalme, en el cantón Mocache provincia de Los Ríos a una altitud de 75 m con sus coordenadas geográficas 1° 20' 30" S y 79° 28' 30" O. Las muestras de suelo del estudio fueron recolectadas de un sistema agroforestal de cacao y teca en la finca experimental "La Represa" UTEQ, con coordenadas geográficas 1° 3' 42" S y 79° 25' 13" O en el cantón Quevedo, en la provincia de Los Ríos.

### Muestreo y Conservación del Suelo

Se recolectaron cinco muestras de 1 kg de suelo cada una de un sistema agroforestal mediante un muestreo con una barra holandesa a una profundidad máxima de 20 cm, con la aplicación de etanol al 70% entre cada recolección para evitar una contaminación cruzada. Las muestras fueron depositadas en bolsas plásticas a una temperatura entre 4 a 10 °C de conservación en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

### Extracción y Evaluación de la Densidad de Esporas de HMA

La extracción de esporas se realizó mediante el método de tamizado húmedo y centrifugación en gradiente de sacarosa descrito por Gerdemann y Nicolson (1963). Se diluyeron 0.05 kg de suelo en 500 mL de agua, mezclando durante 10 segundos. La suspensión se dejó decantar para ser tamizada posteriormente con mallas de 900, 450, 90 y 75  $\mu\text{m}$ , este proceso se repitió dos veces por muestra. El material retenido fue transferido a tubos con soluciones de sacarosa al 20% y 60%, y se centrifugó durante 3 minutos a 3000 rpm, seguidamente se pasó por un tamiz de 75  $\mu\text{m}$  el sobrenadante y se lavó con agua estéril. Las esporas recuperadas se transfirieron a placas Petri cuadrículadas espaciadas a 1 cm para facilitar el conteo de esporas. Por último, las esporas se aislaron mediante micropipeta y se colocaron en tubos Eppendorf para su identificación.

### Evaluación Morfológica de Esporas de HMA

Las esporas fueron agrupadas en morfotipos de acuerdo con características como tamaño, color y ornamentación de la pared. La identificación se basó en los criterios taxonómicos y características descritas por Błaszowski (2012), complementados con la base de datos de la Colección Internacional de Hongos Micorrízicos Arbusculares (INVAM). Para el propósito, las esporas fueron montadas en portaobjetos utilizando polivinil lacto glicerol (PVLG) y PVLG + reactivo de Melzer (1:1, v/v).

### Diseño Experimental

La investigación se condujo bajo un diseño factorial completamente al azar, con un arreglo factorial 3×4, con tres tipos de inóculo micorrízico (líquido, sólido y del suelo) y cuatro tratamientos, incluido el testigo sin inoculación, evaluados bajo tres concentraciones de cadmio (15, 30 y 45 mg kg<sup>-1</sup>). Se establecieron 12 tratamientos, con cuatro repeticiones por tratamiento, para un total de 48 unidades experimentales. La unidad experimental estuvo constituida por un recipiente individual con plantas de arroz (*Oryza sativa*) mantenidas en condiciones controladas de invernadero. Los tratamientos fueron distribuidos de forma aleatoria para minimizar posibles efectos ambientales.

## Conducción del Experimento e Inoculación Micorrízica

Para el experimento se utilizaron cinco semillas de arroz (*Oryza sativa*) por recipiente, desinfectadas en una solución de hipoclorito de sodio (NaClO) al 10% por tres minutos y germinadas en toallas estériles humedecidas con agua destilada. Asimismo, el sustrato fue mezclado con materia orgánica de fibra de coco y perlita, bajo un proceso de esterilización mediante una autoclave a 121 °C y 1 atm por 2 horas. Las semillas fueron depositadas en recipientes de siete onzas con el sustrato esterilizado, mientras que para la esterilización de los recipientes se aplicó etanol al 70%. El experimento se mantuvo en condiciones controladas de invernadero bajo riego diario durante 25 días. Mientras que las esporas aisladas se inocularon después de siete días de crecimiento de las plantas (*Oryza sativa*) con 10 esporas HMA en cada recipiente como primer tratamiento. Del mismo modo, se inocularon hongos micorrízicos comerciales mediante la aplicación de 3 mL de una formulación líquida como tratamiento líquido y 10 g de una formulación sólida como tratamiento sólido.

Para definir las dosis aplicadas en cada tratamiento se consideraron las diferencias en la composición de los inóculos, en el caso del inóculo micorrízico comercial en formulación líquida estuvo constituido principalmente por esporas viables de hongos micorrízicos arbusculares, de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante. En contraste, la formulación sólida consistió en una mezcla de propágulos micorrízicos, incluyendo esporas, hifas fúngicas y fragmentos de raíces previamente colonizadas.

## Contaminación con Cadmio

El cadmio utilizado para el experimento fue proporcionado por el laboratorio de microbiología que contó con una concentración inicial de 200 mg kg<sup>-1</sup>. A través de diluciones de la concentración inicial se prepararon concentraciones finales de 15, 30 y 45 mg kg<sup>-1</sup>, las cuales se aplicaron directamente al sustrato.

## Evaluación de Plantas Trampa (*Oryza sativa*)

A los 15 y 25 días posteriores a la contaminación con Cadmio (Cd), Para las variables destructivas, la parte aérea y el sistema radicular fueron separados mediante un corte a la altura del cuello de la planta. Cada fracción fue almacenada en bolsas debidamente etiquetadas. Las raíces fueron desprendidas del sustrato, lavadas con agua destilada para eliminar restos de suelo y posteriormente almacenadas en bolsas de papel. En total, se procesaron nueve muestras (parte aérea, parte radicular y suelo) enviadas al Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias del Ecuador (INIAP) para los análisis correspondientes.

## Altura y Diámetro de las Plantas

La altura de las plantas se cuantificó a los 15 y 25 días, midiendo la distancia desde la base del tallo (cuello) hasta el ápice visible, empleando una cinta métrica de precisión; los resultados se expresaron en centímetros (cm). El diámetro del tallo se determinó mediante un calibrador Vernier, registrándose los valores en milímetros (mm)

## Número de Hojas

El número de hojas se contabilizó manualmente en cada planta a los 15 y 25 días, considerando únicamente hojas completamente desarrolladas.

## Producción de Materia Húmeda y Seca Foliar

El peso fresco de la biomasa foliar se evaluó a los 25 días posteriores a la contaminación artificial de Cd, utilizando una balanza digital marca Ohaus. Posteriormente el material fue sometido a secado en estufa a 65 °C durante 72 horas para obtener el peso seco.

## Producción de Materia Húmeda y Seca Radicular

El peso fresco de las raíces se determinó igualmente a los 25 días posteriores a la inoculación, registrándose los valores en una balanza digital marca Ohaus. Posteriormente el material fue sometido a secado en estufa a 65 °C durante 72 horas para obtener el peso seco.

## Análisis Estadístico

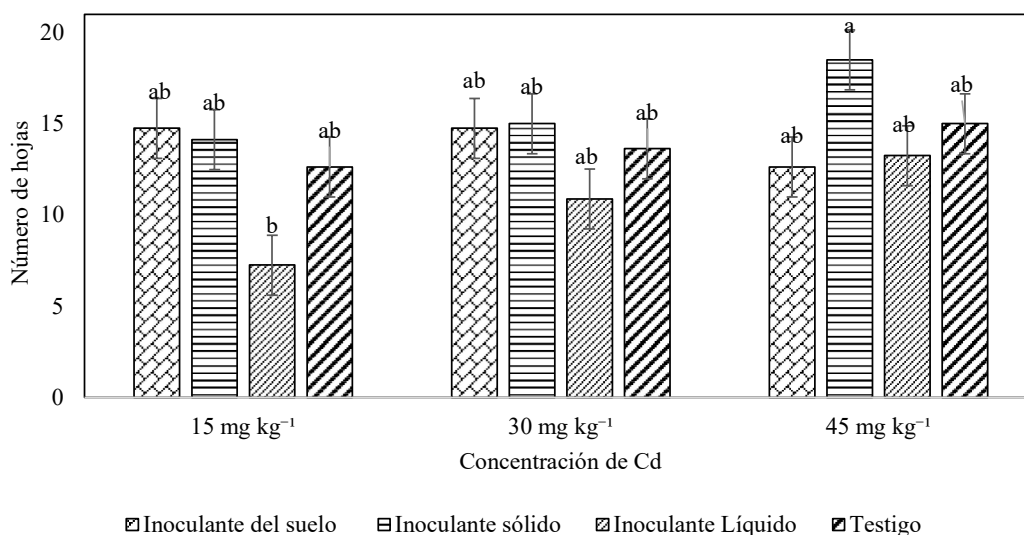
La base de datos generada a partir de las variables agronómicas, incluyendo altura de planta, diámetro del tallo y número de hojas, evaluadas a los 15 y 25 días, así como la biomasa foliar y radicular, determinadas al final del experimento, fue analizada mediante el software Statgraphics Version 19 (Statgraphics Technologies Inc, 2023). Para las variables de altura, diámetro del tallo y número de hojas, al corresponder a mediciones realizadas en más de un momento de evaluación, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) factorial, considerando los factores días y concentración de Cd, así como su interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), se realizaron comparaciones múltiples de medias mediante el método de Tukey HSD y, en algunos casos, el método LSD, de acuerdo con el modelo estadístico aplicado por el software.

Para la representación gráfica de estas variables, los datos correspondientes a ambos tiempos de evaluación (15 y 25 días) fueron considerados de manera conjunta, integrando las cuatro repeticiones por tratamiento en cada tiempo, lo que resultó en un tamaño muestral efectivo de  $n = 8$  por tratamiento. Las variables de biomasa foliar y radicular, medidas únicamente a los 25 días, fueron analizadas mediante un ANOVA de un factor. En aquellos casos donde se detectaron diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), se aplicó una prueba de comparación múltiple, empleando el método de la Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher, con un nivel de confianza del 95%. Los resultados se expresaron mediante grupos homogéneos identificados por letras.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Número de Hojas Funcionales

El número de hojas funcionales en *Oryza sativa* estuvo determinado en gran medida por la concentración de Cd según el ANOVA tipo III ( $p = 0.0054$ ), sin mostrar un efecto significativo del tiempo ni de su interacción ( $p = 0.3177$ ) como muestra la Figura 1. El mayor desarrollo foliar se observó en plantas tratadas con inoculante sólido a una concentración de Cd de  $45 \text{ mg kg}^{-1}$ , diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos de menor desempeño (Tukey,  $p < 0.05$ ) al alcanzar una media de 18.5 hojas. En contraste, el valor mínimo correspondió al inoculante líquido a una concentración de Cd a  $15 \text{ mg kg}^{-1}$ , con 7.25 hojas, conformando un grupo estadísticamente separado. El inoculante del suelo y el grupo de control compartieron grupos homogéneos al mostrar valores intermedios sin diferencias significativas entre sí.



**Figura 1. Número de hojas funcionales en plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias por mínimos cuadrados  $\pm$  error estándar (EE) ( $n=8$ ). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

**Figure 1. Number of functional leaves in rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different inocula of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent means by least squares  $\pm$  standard error (SE) ( $n=8$ ). Different letters indicate statistically significant differences between treatments according to Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

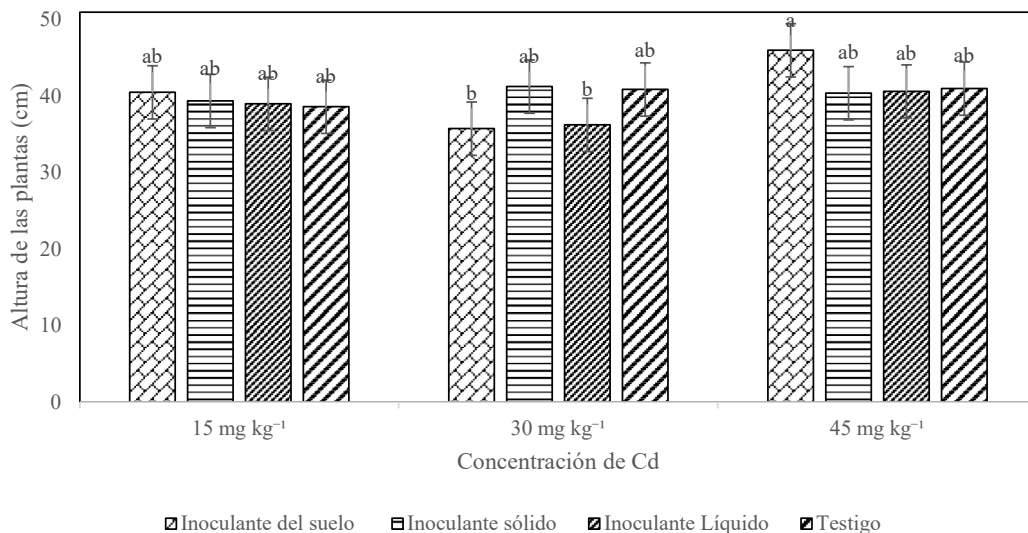
El desempeño descrito concuerda con los hallazgos reportados por Vallejos *et al.* (2023), quienes observaron que la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares estimula el crecimiento y la biomasa de *Oryza sativa* en condiciones de exposición de Cd en comparación con plantas no inoculadas. Mientras que la similitud observada entre el inoculante del suelo y el grupo de control puede explicarse a partir de lo señalado por AL-Huqail *et al.* (2025), quienes indicaron que la dinámica fisiológica del cultivo ante el Cd depende tanto de la formulación del inóculo micorrízico como de las condiciones del sustrato, observando diferencias entre formulaciones a pesar de utilizar el mismo hospedero.

### Altura de Plantas

La altura de *Oryza sativa* no mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, concentraciones de Cd ni su interacción según el ANOVA ( $p > 0.05$ ). La Figura 2 exhibe la altura promedio, mostrando una variación limitada entre 35 y 46 cm, alcanzando el máximo bajo el inoculante del suelo a 45 mg kg<sup>-1</sup> y la altura mínima promedio a 30 mg kg<sup>-1</sup>. Estos resultados indican que, bajo las condiciones del experimento, la altura de las plantas fue relativamente estable frente al estrés por Cd y a la formulación micorrízica, lo que sugiere que esta variable es menos sensible que otros atributos biométricos evaluados. Hallazgos similares han sido reportados por Begum *et al.* (2020) y Luo, Ma y Xue (2020), quienes señalan que los efectos de los HMA suelen manifestarse con mayor claridad en variables relacionadas con biomasa y desarrollo radicular, más que en la altura del tallo.

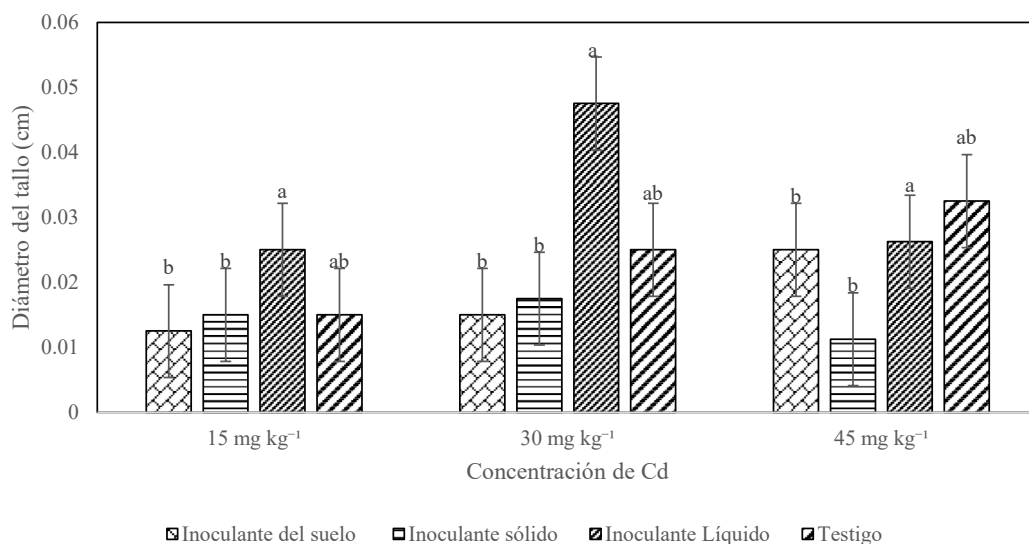
### Diámetro de Plantas

En relación con el diámetro de *Oryza sativa*, el análisis de varianza multifactorial evidenció un efecto significativo del tipo de tratamiento ( $p < 0.05$ ), mientras que la concentración de Cd y el tiempo de evaluación no mostraron efectos significativos ( $p > 0.05$ ). De acuerdo con la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, el tratamiento con inóculo líquido presentó los mayores valores promedio de diámetro de tallo, diferenciándose significativamente del testigo (Figura 3). Los tratamientos con inóculo sólido e inóculo del suelo no mostraron diferencias significativas entre sí ni respecto al tratamiento líquido. Estos resultados sugieren que la formulación del inóculo micorrízico desempeña un papel determinante en el crecimiento del tallo, independientemente de la concentración de Cd evaluada.



**Figura 2. Altura de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias por mínimos cuadrados  $\pm$  error estándar (EE) ( $n=8$ ). No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según el análisis de varianza (ANOVA,  $p > 0.05$ ).

**Figure 2. Height of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different inocula of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent means by least squares  $\pm$  standard error (SE) ( $n = 8$ ). No statistically significant differences were detected between treatments according to analysis of variance (ANOVA,  $p > 0.05$ ).



**Figura 3. Diámetro de tallo de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias por mínimos cuadrados  $\pm$  error estándar (EE) ( $n = 8$ ). Letras distintas indican diferencias significativas entre tipos de tratamiento según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

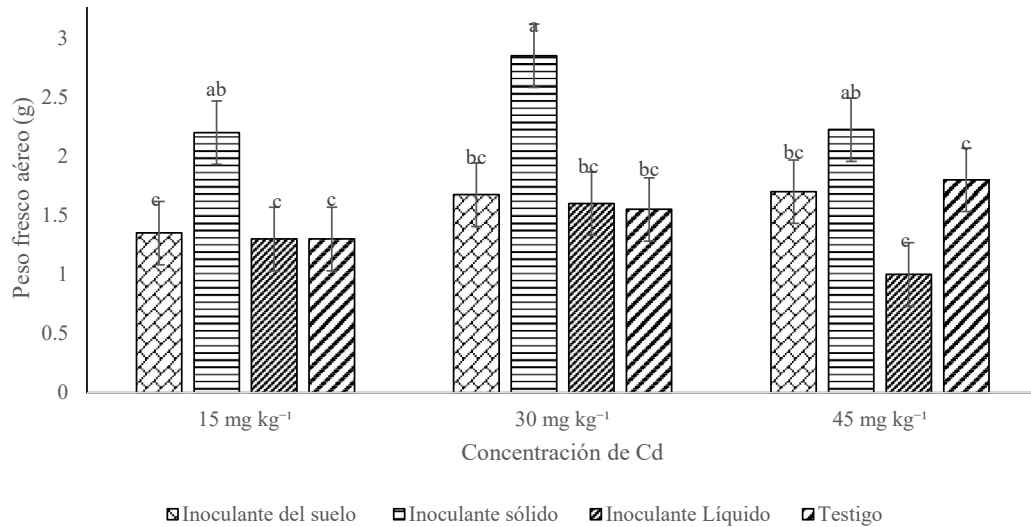
**Figure 3. Stem diameter of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different inocula of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent least squares means  $\pm$  standard error (SE) ( $n = 8$ ). Different letters indicate significant differences among treatment types according to Tukey's test ( $p < 0.05$ ).

El uso de formulaciones líquidas puede favorecer una distribución más uniforme del inóculo en el sustrato, lo que podría facilitar un establecimiento micorrízico más homogéneo y funcional en las plantas. Este comportamiento ha sido reportado previamente en estudios donde las formulaciones líquidas de HMA facilitan una colonización más eficiente y una mayor absorción de nutrientes, promoviendo el crecimiento vegetal bajo condiciones de estrés (Crespo-Flores, Ramírez, Vallejo, Méndez y González, 2022). En contraste, el desempeño del tratamiento sólido y de suelo podría relacionarse con una menor disponibilidad inicial de propágulos o con una distribución menos uniforme en el sustrato.

### Peso Fresco Aéreo

Con respecto al peso fresco aéreo, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (ANOVA,  $p < 0.05$ ), evidenciando un efecto diferencial de los distintos inóculos micorrízicos sobre el peso fresco aéreo de *Oryza sativa* (Figura 4). El inóculo sólido mostró la mayor media de peso fresco aéreo a 30 mg kg<sup>-1</sup> con 2.85 g, en un grupo estadísticamente superior, lo que indica una mayor eficiencia en la producción de biomasa aérea en presencia del metal. En contraste, el inóculo líquido presentó las menores medias para el peso fresco aéreo entre 1.0 a 1.6 g y se agrupó en los niveles estadísticamente inferiores, evidenciando un menor aporte a la acumulación de biomasa aérea. Este comportamiento difiere de los hallazgos descritos por Silva-Laya, Silva, Pérez y Álvarez (2021) quienes señalaron un efecto positivo del inóculo líquido sobre la captación de nutrientes y la disponibilidad hídrica.

Por su parte, el inóculo del suelo y el grupo de control compartieron grupos homogéneos en diversas concentraciones de Cd, indicando ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre estos tratamientos. Este efecto puede atribuirse a diferencias en el establecimiento y funcionalidad del inóculo micorrízico aplicado, lo que condiciona el desarrollo fisiológico de *Oryza sativa* frente a la presencia de Cd. La mayor biomasa aérea observada con el inóculo sólido sugiere una mejor eficiencia en la transferencia de nutrientes hacia la parte aérea. Lo expuesto resalta la relevancia de elegir adecuadamente la formulación de inóculo a emplear, ya que su eficacia puede influir notablemente en el aprovechamiento de la simbiosis micorrízica en diversos sistemas agrícolas (Crespo-Flores et al., 2022).



**Figura 4. Peso fresco aéreo de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias  $\pm$  error estándar (EE) (n = 4). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, con un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0.05$ ).

**Figure 4. Fresh aerial weight of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different inocula of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent means  $\pm$  standard error (SE) (n = 4). Different letters indicate statistically significant differences between treatments according to Fisher's least significant difference (LSD) test, with a 95% confidence level ( $p < 0.05$ ).

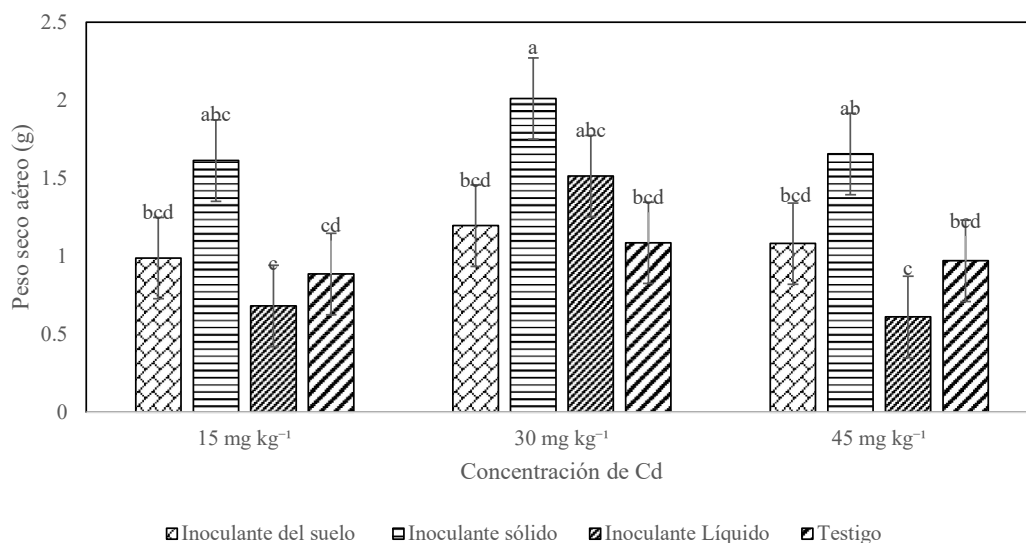
### Peso Seco Aéreo

El peso fresco radicular de *Oryza sativa* presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (ANOVA,  $p < 0.05$ ) (Figura 5). El inóculo sólido mostró una media superior de biomasa seca aérea a una concentración de 30 mg kg<sup>-1</sup> (2.01 g) y estadísticamente superior a los demás tratamientos, indicando una mayor tolerancia al estrés por Cd. La aplicación del inóculo líquido se asoció con los valores más bajos de peso seco aéreo, agrupándose en grupos estadísticos inferiores. En contraste, el inóculo de suelo y el testigo exhibieron valores intermedios y estadísticamente similares, con medias entre 0.99 hasta 1.20 g, evidenciando un impacto limitado sobre la biomasa aérea seca.

La tendencia descrita indica que el efecto del inóculo líquido puede depender de las condiciones específicas del sistema suelo-planta-metal. Este patrón difiere de lo reportado por Sun y Shahrajabian (2023), quienes reportaron que los inóculos líquidos pueden favorecer un crecimiento vegetativo superior debido a su mayor capacidad de dispersión en el sustrato, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes esenciales para la planta. Sin embargo, en el presente estudio dicha formulación no generó aumentos en el peso seco aéreo, evidenciando que la eficacia de los inóculos micorrízicos puede verse restringida por el nivel de estrés por Cd y por su capacidad de establecer una simbiosis funcional en el suelo.

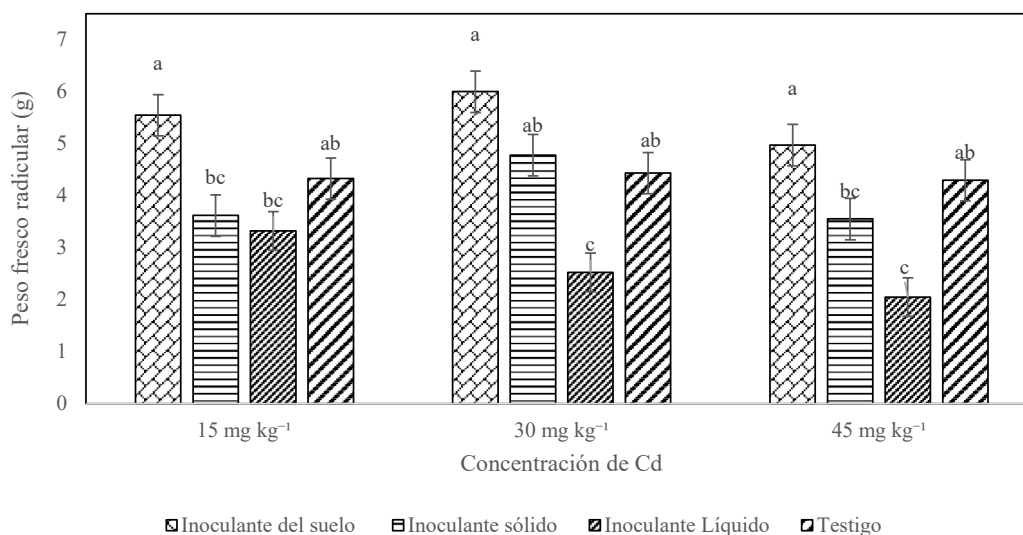
### Peso Fresco Radicular

El peso seco aéreo de *Oryza sativa* respondió de manera diferencial a la formulación del inóculo y a la concentración de Cd (Figura 6), con una clara segregación de grupos estadísticos según el ANOVA de una vía ( $p < 0.05$ ). El inóculo del suelo promovió la mayor biomasa radicular en las tres concentraciones evaluadas, alcanzando valores cercanos a 6.0 g a una concentración de Cd a 30 mg kg<sup>-1</sup> y diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos, mostrando una mayor tolerancia del sistema radicular al estrés por Cd. En contraste, el inóculo sólido y el inóculo líquido presentaron una menor efectividad para sostener el crecimiento radicular de *Oryza sativa*, similar al desempeño del tratamiento testigo, con una reducción de biomasa a concentraciones elevadas del metal.



**Figura 5. Peso seco aéreo de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias  $\pm$  error estándar (EE) ( $n = 4$ ). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos según la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, con un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0.05$ ).

**Figure 5. Air dry weight of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculants and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent means  $\pm$  standard error (SE) ( $n = 4$ ). Different letters indicate statistically significant differences between treatments according to Fisher's least significant difference (LSD) test, with a 95% confidence level ( $p < 0.05$ ).



**Figura 6. Peso fresco radicular de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan las medias  $\pm$  error estándar (EE) ( $n = 4$ ). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba LSD al 95% de confianza ( $p < 0.05$ ).

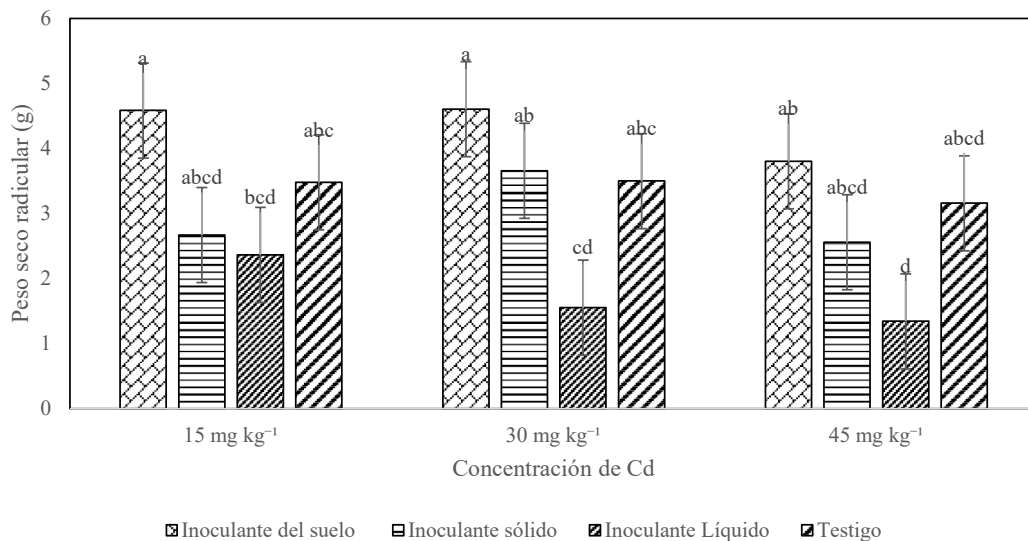
**Figure 6. Fresh root weight of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculants and exposed to three different Cd concentrations.** Bars represent means  $\pm$  standard error (SE) ( $n = 4$ ). Different letters indicate statistically significant differences between treatments according to the LSD test at 95% confidence ( $p < 0.05$ ).

A diferencia de la biomasa aérea, el desarrollo radicular mostró una mayor dependencia del inóculo nativo del suelo, lo que sugiere que los efectos del metal y de los inóculos no se expresan de manera homogénea entre órganos de la planta. Este comportamiento puede interpretarse a la luz de estudios previos que señalan que la eficacia de los inóculos, particularmente en formulaciones líquidas, depende de su adecuado establecimiento y dispersión en el sustrato. Aunque se ha reportado que los inóculos líquidos pueden mejorar la retención de humedad y favorecer la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno bajo condiciones de estrés (Saberri Riseh, Ebrahimi, Gholizadeh y Skorik, 2021), dichos efectos positivos están condicionados por factores edáficos como la textura del suelo, la movilidad del microorganismo y la presencia de metales pesados.

### Peso Seco Radicular

La biomasa radicular seca no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ni concentraciones de Cd, de acuerdo con el ANOVA de una vía ( $p = 0.0514$ ). No obstante, se identificaron patrones descriptivos asociados al inóculo bajo el estrés metálico. La Figura 7 muestra que el inoculante del suelo favoreció el desarrollo radicular, registrando los valores más altos de biomasa radicular seca, con 4.6, 4.58 y 3.80 g a concentraciones de 30, 15 y 45 mg kg<sup>-1</sup> de Cd, respectivamente. El desempeño del inóculo sólido estuvo ligado a la concentración del metal, mientras que el inóculo líquido exhibió las medias más bajas a lo largo de todo el gradiente de Cd, similares al tratamiento testigo.

Aunque estas diferencias no alcanzaron significancia estadística, el patrón observado sugiere que la forma del inóculo podría influir en el desarrollo radicular bajo condiciones de estrés por Cd. Estudios previos han reportado efectos positivos de los inoculantes micorrízicos sobre el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes, asociados con una mayor colonización y eficiencia simbiótica en el sustrato (Quiñones-Aguilar, Rincón y López, 2021; Sun y Shahrajabian, 2023). Sin embargo, en el presente estudio, la formulación líquida no mostró un efecto favorable en términos de peso seco radicular, lo que sugiere que la eficacia del inóculo puede verse limitada por la interacción entre la concentración de Cd y las condiciones edáficas.



**Figura 7. Peso seco radicular de plantas de arroz (*Oryza sativa*) colonizadas con tres diferentes inóculos de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y expuestas a tres diferentes concentraciones de Cd.** Las barras representan medias  $\pm$  error estándar (EE) ( $n = 4$ ). No se detectaron diferencias significativas entre tratamientos (ANOVA de una vía;  $p = 0.0514$ ).

**Figure 7. Dry root weight of rice plants (*Oryza sativa*) colonized with three different inocula of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and exposed to three different concentrations of Cd.** Bars represent means  $\pm$  standard error (SE) ( $n = 4$ ). No significant differences were detected between treatments (one-way ANOVA;  $p = 0.0514$ ).

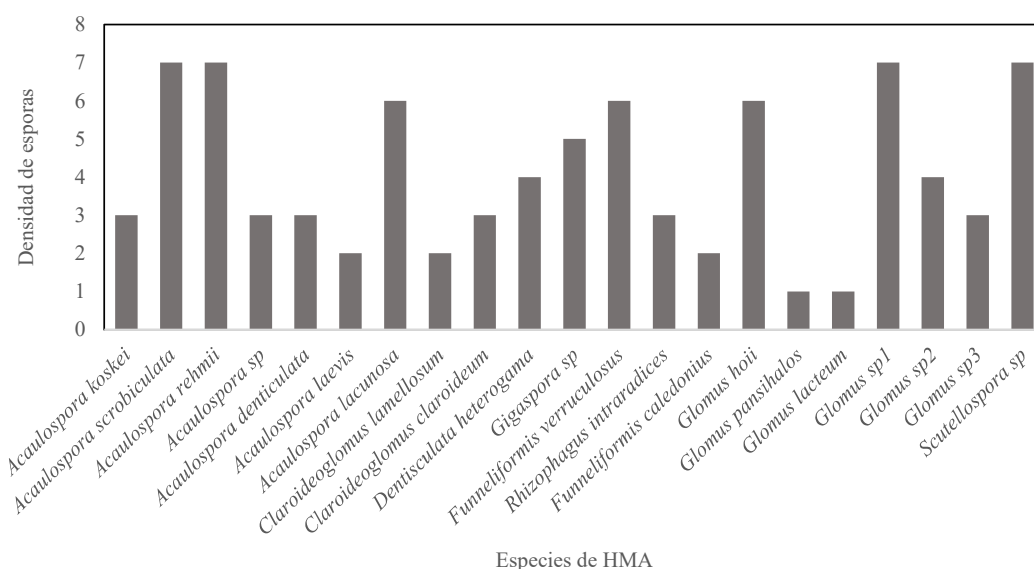
## Caracterización de Propágulos de HMA

La densidad de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en el suelo del sistema agroforestal cacao-teca de la zona de estudio mostró una distribución heterogénea entre las especies identificadas (Figura 8). Se observó una mayor representación de especies pertenecientes a los géneros *Acaulospora*, *Glomus* y *Scutellospora*, los cuales han sido reportados como dominantes en suelos agrícolas tropicales y con alta capacidad de persistencia bajo condiciones de manejo intensivo. La presencia de estos géneros sugiere una comunidad micorrízica funcional y diversa, capaz de generar un banco de propágulos viable.

## Respuesta de Extracción de Cd en *Oryza sativa*

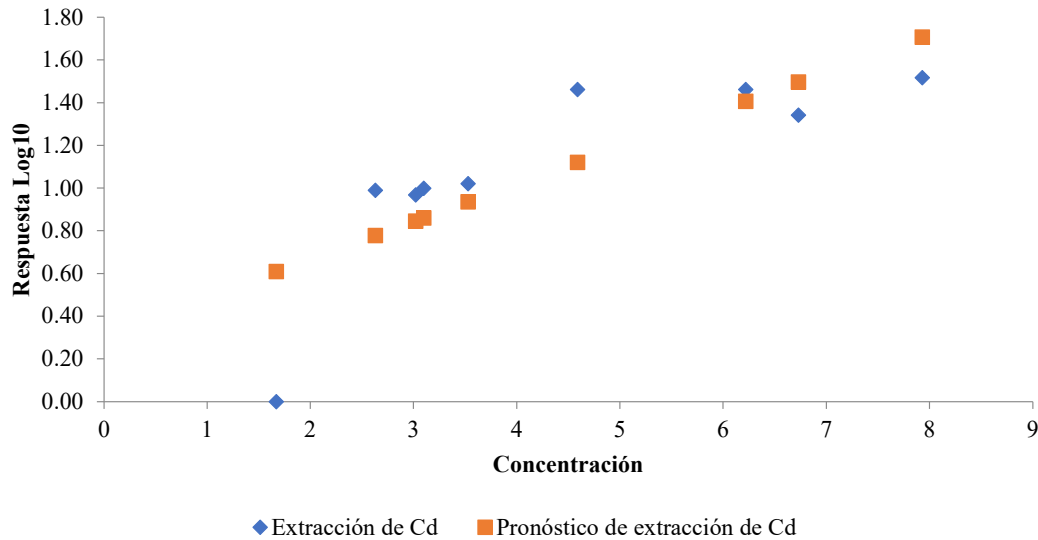
La evaluación cuantitativa de la extracción de cadmio por *Oryza sativa* evidenció una relación positiva y estadísticamente significativa entre la concentración del metal y la respuesta biológica de la planta. El modelo de regresión lineal ajustado explicó el 58.4% de la variabilidad observada ( $R^2$  ajustado = 0.58), con una pendiente significativa ( $p = 0.010$ ), indicando un aumento progresivo de la extracción de Cd conforme se incrementó la concentración en el sistema. Los mayores valores de extracción se registraron en tejidos foliares, lo que sugiere una translocación eficiente del metal desde la raíz hacia la parte aérea. El análisis de residuos confirmó la adecuación del modelo, sin evidenciar patrones de heterocedasticidad ni sesgos sistemáticos. Estos resultados confirman la capacidad del arroz para extraer cadmio de suelos agrícolas, mostrando un potencial como estrategias de fitorremediación bajo condiciones de agricultura intensiva.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Takahashi, Ito y Kawamoto (2021), quienes señalan que la acumulación de Cd en brotes de arroz está asociada a mecanismos de transporte y secuestro mediados por ciertos transportadores, responsables de la movilización del metal desde la raíz hacia la parte aérea. De esta manera, los resultados obtenidos sugieren que el Cd absorbido puede ser eficientemente translocado a órganos aéreos, reforzando el potencial del arroz como especie candidata para fitorremediación. Asimismo, la relación positiva entre la concentración de Cd y la respuesta logarítmica observada es consistente con estrategias de fitorremediación activa, donde una mayor disponibilidad del metal favorece su extracción por la planta. Estudios de campo, como el de Li *et al.* (2024), reportan eficiencias de extracción aérea entre 3.46 y 6.37% en sistemas con arroz. De manera similar, Wang *et al.* (2025) describen que el Cd en arroz se transporta preferentemente vía xilema hacia tejidos aéreos. La relación entre la concentración de Cd y la extracción del metal por *Oryza sativa* se presenta en la Figura 9, donde se observa una tendencia positiva que respalda el ajuste del modelo de regresión y confirma el incremento progresivo de la extracción conforme aumenta la disponibilidad del contaminante.



**Figura 8. Densidad de esporas de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) presentes en el suelo del sistema agroforestal cacao-teca de la zona de estudio.** Las barras representan el número de esporas por 50 g de suelo seco, identificadas mediante criterios morfológicos.

**Figure 8. Density of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) spores present in the soil of the cocoa-teak agroforestry system in the study area.** The bars represent the number of spores per 50 g of dry soil, identified using morphological criteria.



**Figura 9. Relación entre la concentración de cadmio disponible y la extracción de Cd en plantas de arroz (*Oryza sativa*).** Los puntos azules representan los valores observados para cada tratamiento, mientras que los puntos naranjas corresponden a los valores predichos por el modelo de regresión lineal ajustado. Cada punto representa el promedio ( $n = 3$ ) por tratamiento (hojas y raíces bajo condiciones de suelo, solución sólida, líquida y testigo). El modelo mostró una relación positiva y significativa ( $p = 0.010$ ).

**Figure 9. Relationship between available cadmium concentration and uptake response in rice plants (*Oryza sativa*).** Blue dots represent observed values for each treatment, while orange dots correspond to values predicted by the adjusted linear regression model. Each point represents the average ( $n = 3$ ) per treatment (leaves and roots under soil, solid solution, liquid solution, and control conditions). The model showed a positive and significant relationship ( $p = 0.010$ ).

## CONCLUSIONES

La aplicación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) influyó de manera diferenciada en el crecimiento de *Oryza sativa* frente a concentraciones crecientes de cadmio. Las formulaciones sólidas favorecieron la acumulación de biomasa aérea y el número de hojas funcionales, mientras que el inóculo líquido promovió un mayor diámetro de tallo, evidenciando que la respuesta del cultivo depende del tipo de formulación micorrízica. La altura de las plantas fue estable frente a los tratamientos. Asimismo, *O. sativa* presentó una capacidad efectiva de extracción y translocación de Cd hacia la parte aérea, lo que respalda su potencial en estrategias de fitorremediación. De esta manera se resalta la importancia de una selección estratégica del inóculo micorrízico para optimizar el desempeño del cultivo en suelos agrícolas contaminados por Cd.

## 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

No aplicable.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: O.O.P.B. y J.E.N.R.; Metodología: O.O.P.B. y J.E.N.R.; Validación: J.P.U.Z. y S.A.Z.M.; Análisis formal: J.P.U.Z. y S.A.Z.M.; Investigación: O.O.P.B. y J.E.N.R.; Curación de datos: J.P.U.Z. y S.A.Z.M.; Escritura – preparación del borrador original: O.O.P.B.; Escritura – revisión y edición: O.O.P.B. y J.J.E.Y.; Visualización: O.O.P.B. y J.J.E.Y.

## 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

- Al-Huqail, A. A., Alatawi, A., Javed, S., Tahir, M. F., Anas, M., Saleem, M. H., ... & Fahad, S. (2025). Individual and combinatorial applications of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria increase morpho-physio-biochemical responses in rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(2), 2673-2691.
- Al-Maliki, S., & Al-Shamary, A. (2022). Vital evidence for arbuscular mycorrhizal fungi, bacteria and cattail plant to remove Pb-Cd heavy metals from contaminated soils. *Acta Ecologica Sinica*, 42(4), 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2022.05.008>
- Atiaga, O., Ruales, J., Nunes, L. M., & Otero, X. L. (2021). Toxic elements in soil and rice in Ecuador. *Agronomy*, 11(8), 1594. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081594>
- Begum, N., Ahanger, M. A., Su, Y., Lei, Y., Mustafa, N. S. A., Ahmad, P., & Zhang, L. (2019). Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. *Plants*, 8(12), 579. <https://doi.org/10.3390/plants8120579>
- Błaszowski, J. (2012). *Glomeromycota*. Kraków, Poland: W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences.
- Crespo-Flores, G., Ramírez-Tobias, H. M., Vallejo-Pérez, M. R., Méndez-Cortés, H., & González-Cañizares, P. J. (2022). Inoculación con rizobios y hongos micorrízicos arbusculares en plantas de *Leucaena leucocephala* en etapa de vivero y en sustrato con pH neutro. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 10(2), 98-108. [https://doi.org/10.17138/tgft\(10\)98-108](https://doi.org/10.17138/tgft(10)98-108)
- Deknock, A., De Troyer, N., Houbraken, M., Dominguez-Granda, L., Nolivos, I., Van Echelpoel, W., ... & Goethals, P. (2019). Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador). *Science of the Total Environment*, 646, 996-1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>
- Dixit, S., Tracy, P., Vishnoi, N., Swain, A. A., Baudhdh, K., & Kumar, M. (2022). Phytoremediation of heavy metal contaminated soil in association with arbuscular mycorrhizal fungi. In *Advances in Microbe-assisted Phytoremediation of Polluted Sites* (pp. 207-230). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823443-3.00016-8>
- Ferrol, N., Tamayo, E., & Vargas, P. (2016). The heavy metal paradox in arbuscular mycorrhizas: from mechanisms to biotechnological applications. *Journal of Experimental Botany*, 67(22), 6253-6265. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw403>
- 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>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2021). *Módulo de información ambiental y tecnificación agropecuaria ESPAC 2020: Principales resultados*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Li, M., Chen, L., Yang, Y., Wu, S., Zhang, Q., Deng, X., ... & Zeng, Q. (2024). Analysis of the phytoremediation potential, rice safety, and economic benefits of light to moderate Cd-contaminated farmland in oilseed rape-rice rotation with straw removal: A three-year field trial. *Environmental Research*, 263, 120280. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120280>
- Luo, J., Ma, S., & Xue, X. (2020). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and plant growth-promoting bacteria (PGPR) inoculations on *Elaeagnus angustifolia* L. in Saline Soil. *Applied Sciences*, 10(3), 945.
- Ochoa, M., Tierra, W., Tupuna-Yerovi, D. S., Guanoluisa, D., Otero, X. L., & Ruales, J. (2020). Assessment of cadmium and lead contamination in rice farming soils and rice (*Oryza sativa* L.) from Guayas province in Ecuador. *Environmental Pollution*, 260, 114050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114050>
- Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., & López-Pérez, L. (2020). Hongos micorrízicos nativos como promotores de crecimiento en plantas de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(3), 541-554. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.646>
- Saberi Riseh, R., Ebrahimi-Zarandi, M., Gholizadeh Vazvani, M., & Skorik, Y. A. (2021). Reducing drought stress in plants by encapsulating plant growth-promoting bacteria with polysaccharides. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(23), 12979.
- Schommer, V. A., Vanin, A. P., Nazari, M. T., Ferrari, V., Dettmer, A., Colla, L. M., & Piccin, J. S. (2023). Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: A review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil. *Science of The Total Environment*, 881, 163385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163385>
- Silva-Laya, S. J., Silva-Laya, Y. M., Pérez-Martínez, S., & Álvarez del Castillo, J. (2021). Modernidad, crisis de insostenibilidad, agroecología, pedagogía e investigación. *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 9(2), 1-20.
- Statgraphics Technologies Inc. (2023). *Statgraphics Centurion (Version 19)*. The Plains, VA, USA: Statgraphics Technologies, Inc.
- Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*, 12(17), 3101. <https://doi.org/10.3390/plants12173101>

- Takahashi, R., Ito, M., & Kawamoto, T. (2021). The road to practical application of cadmium phytoremediation using rice. *Plants*, 10(9), 1926. <https://doi.org/10.3390/plants10091926>
- Tufail, M. A., Iltaf, J., Zaheer, T., Tariq, L., Amir, M. B., Fatima, R., ... & Ayyub, M. (2022). Recent advances in bioremediation of heavy metals and persistent organic pollutants: A review. *Science of the Total Environment*, 850, 157961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157961>
- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Ordoñez-Sánchez, L., Lozano, C., Arevalo, A. A., Lozano, A., ... & Marín, C. (2023). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, poultry manure compost, and cadmium on plant growth and nutrient absorption of *Oryza sativa*. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83(6), 656-665. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392023000600656>
- Wang, J., Wu, B., Zhou, L., Liu, K., You, A., & Zha, W. (2025). Cadmium contamination in Asian rice (*Oryza sativa* L.): mechanistic insights from soil sources to grain accumulation and mitigation strategies. *Plants*, 14(18), 2844. <https://doi.org/10.3390/plants14182844>