



Interacción micorrízica arbuscular como estrategia para mitigar cadmio en cacao bajo diferentes agroecosistemas en San Martín

Arbuscular mycorrhizal interaction as a strategy to mitigate cadmium in cacao under different agroecosystems in San Martín

Cueva-Paredes, Daniel Lister^{1*}

Corazon-Guivin, Mike Anderson¹

Pezo-Torres, María Nelly¹

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

Recibido: 20 Nov. 2025 | **Aceptado:** 29 May. 2026 | **Publicado:** 20 Jul. 2026

Autor de correspondencia*: dlcuevap@alumno.unsm.edu.pe

Cómo citar este artículo: Cueva-Paredes, D. L., Corazon-Guivin, M. A. & Pezo-Torres, M. N. (2026). Interacción micorrízica arbuscular como estrategia para mitigar cadmio en cacao bajo diferentes agroecosistemas en San Martín. *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 6(2), e1284. <https://doi.org/10.51252/raa.v6i2.1284>

RESUMEN

El cacao es un cultivo de gran importancia económica para la región San Martín; sin embargo, la presencia de cadmio en sus semillas limita su comercialización y afecta directamente a los productores. Ante esta problemática, el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) se propone como una estrategia biotecnológica para mejorar el desarrollo vegetal y reducir la acumulación de Cd. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la colonización micorrízica sobre el crecimiento y la mitigación de Cd en plántulas de cacao variedad CCN-51, establecidas en dos agroecosistemas contrastantes de San Martín. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con ocho tratamientos y 12 repeticiones, que incluyeron cuatro condiciones de inoculación (control, *Rhizoglyphus variabile*, *R. dunense* y consorcio micorrízico) en las localidades de Shima (0,630 ppm Cd) y Ledoy (0,130 ppm Cd). Los tratamientos con consorcio micorrízico y *R. variabile* promovieron significativamente el crecimiento en altura, área foliar, número de hojas y biomasa aérea y radicular. Aunque las reducciones de Cd en hojas y raíces no fueron significativas, se observó una tendencia decreciente respecto al control. La inoculación con HMA se presenta como una alternativa eficaz para mitigar la acumulación de Cd.

Palabras clave: agroecosistemas; biomasa; crecimiento vegetal; inoculación; hongos micorrízicos arbusculares

ABSTRACT

Cacao is a crop of great economic importance to the San Martín region; however, the presence of cadmium in its seeds limits its commercialization and directly affects producers. Given this problem, the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) is proposed as a biotechnological strategy to improve plant development and reduce cadmium accumulation. The objective of this study was to evaluate the effect of mycorrhizal colonization on growth and cadmium mitigation in cacao seedlings of the CCN-51 variety, established in two contrasting agroecosystems of San Martín. A completely randomized block design with eight treatments and 12 replicates was used, including four inoculation conditions (control, *Rhizoglyphus variabile*, *R. dunense*, and mycorrhizal consortium) in the localities of Shima (0.630 ppm Cd) and Ledoy (0.130 ppm Cd). Treatments with mycorrhizal consortium and *R. variabile* significantly promoted growth in height, leaf area, number of leaves, and shoot and root biomass. Although reductions in Cd in leaves and roots were not significant, a decreasing trend was observed compared to the control. Inoculation with AMF appears to be an effective alternative for mitigating Cd accumulation.

Keywords: agroecosystems; biomass; plant growth; inoculation; arbuscular mycorrhizal fungi



1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de *Theobroma cacao* L., comúnmente conocido como cacao, es uno de los más importantes en la región San Martín, Perú. Este cultivo juega un papel crucial en la economía nacional debido a la creciente demanda internacional de sus granos para la producción de chocolate y otros derivados. En 2024, las exportaciones de cacao generaron ingresos de 1 189 millones de dólares, posicionando al Perú como uno de los principales proveedores en los mercados de Estados Unidos y Europa (MIDAGRI, 2024). Sin embargo, la sostenibilidad de este sector se ve amenazada por prácticas agrícolas inadecuadas, como el uso excesivo de fertilizantes sintéticos y biocidas, así como por procesos de deforestación que contribuyen a la degradación del suelo, provocando acidificación, salinización, pérdida de nutrientes, erosión y contaminación por metales pesados (Anetor et al., 2022). Además, actividades industriales, agrícolas y urbanas han incrementado la presencia de elementos tóxicos como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y arsénico (As) en ecosistemas agrícolas (Paredes-Vilca et al., 2024).

La contaminación por Cd en suelos agrícolas representa un problema ambiental y de salud pública a nivel global, ya que este metal no esencial se caracteriza por su alta movilidad en el sistema suelo-planta y su capacidad de acumularse en órganos comestibles de las plantas (Mendoza-López et al., 2021). En el cacao, el Cd puede reducir el rendimiento y afectar la calidad del producto, además de representar un riesgo para la salud humana por su potencial bioacumulativo y efectos tóxicos (Huamani-Yupanqui et al., 2012). Diversos estudios han identificado factores edáficos, agronómicos y ambientales responsables de la alta concentración de Cd en granos de cacao, especialmente en América Latina (Arévalo-Gardini et al., 2017). Esta situación ha cobrado mayor relevancia tras la implementación del Reglamento (UE) N.º 488/2014, que establece límites máximos de Cd en productos derivados del cacao, afectando directamente la comercialización en mercados internacionales (Florida Rofner, 2021; Santander Ruiz et al., 2021).

En respuesta, se ha incrementado el interés por estrategias sostenibles de mitigación de Cd, entre las que destacan los Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA). Estos hongos biotróficos establecen simbiosis con más del 70 % de las especies vegetales, mejorando la absorción de nutrientes, el crecimiento vegetal y la tolerancia al estrés (Brundrett & Tedersoo, 2018; van der Heijden et al., 2015). Mediante mecanismos fisiológicos y bioquímicos, los HMA pueden reducir la translocación de Cd hacia los órganos aéreos de las plantas (Pérez Moncada et al., 2019), favorecer la inmovilización del metal en la rizosfera y aumentar la estabilidad de los agregados del suelo gracias a la producción de glomalina (Ferreira Vilela & Barbosa, 2019; Ghasemi Siani et al., 2017). Estos procesos convierten a los HMA en aliados clave para la bioestabilización de Cd en agroecosistemas contaminados.

Si bien la mayoría de estudios sobre la interacción cacao-HMA-Cd se han desarrollado en condiciones controladas (ex situ), aún es limitada la evidencia sobre su comportamiento en campo (Bennett & Groten, 2022). Esta información resulta crucial para diseñar prácticas agronómicas efectivas que integren la micorrización como herramienta de mitigación en sistemas agrícolas reales. En este contexto, la región San Martín se presenta como un escenario prioritario, ya que se han reportado niveles preocupantes de Cd en suelos y granos de cacao en provincias como Bellavista y Huallaga, en algunos casos superando los límites permisibles (Mendoza-López et al., 2021; Santander Ruiz et al., 2021).

Por otro lado, los agroecosistemas de cacao muestran diferencias notables en la dinámica del Cd y en la colonización micorrízica. Estudios recientes destacan que los sistemas agroforestales presentan mayor colonización micorrízica (≈ 70 %) y menor concentración de Cd en hojas y granos, en comparación con sistemas en monocultivo. Esto se atribuye, entre otros factores, a suelos con pH más neutro, mayor contenido de materia orgánica y mejores condiciones edáficas, lo que favorece el desarrollo de micelio extraradical y reduce la movilidad del Cd (Gramlich et al., 2018; Vallejos-Torres et al., 2022). Esta evidencia resalta la importancia de evaluar la interacción micorrízica en distintos agroecosistemas como estrategia ecológica para reducir la acumulación de Cd y mejorar la sostenibilidad de la producción cacaotera.

Bajo este marco, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la colonización micorrízica arbuscular en plantas de *Theobroma cacao* L. bajo dos agroecosistemas con presencia de Cd en la región San Martín, analizando su influencia sobre la translocación de Cd y el desarrollo morfológico de las plantas. Se plantea la hipótesis de que las plantas inoculadas con HMA presentan menor translocación de Cd y mejor desarrollo morfológico, constituyendo una alternativa ecológica y sostenible para enfrentar los retos que impone la regulación internacional y la seguridad alimentaria.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se llevó a cabo en dos agroecosistemas de cacao con diferentes condiciones ambientales y niveles de contaminación por cadmio (Cd). El primer sitio fue Ledoy, ubicado en la provincia de Bellavista, y el segundo fue Shima, en la provincia de Saposoa, región San Martín (Perú). En la Tabla 1 se presenta la información georreferencial de ambas zonas, así como la concentración inicial de Cd en el suelo. Una vez culminada las evaluaciones en campo se realizaron las evaluaciones complementarias en el Laboratorio de Biología y Genética Molecular de la Universidad Nacional de San Martín (UNSM). El estudio se desarrolló entre julio de 2023 y marzo de 2024 (8 meses).

Tabla 1. Información georreferencial de las plantaciones experimentales.

Provincia	Sector	X (UTM)	Y (UTM)	Altitud (m.s.n.m.)	Cd (ppm)
Bellavista	Ledoy	317774	9212100	257	0.130
Saposoa	Shima	300763	9236674	334	0.630

Selección de parcelas y análisis de Cd en suelo

Se seleccionaron tres plantaciones de cacao previamente caracterizadas por el INIA respecto a sus niveles de Cd. Se colectaron muestras de suelo y se analizaron en el laboratorio LABISAG (UNTRM) mediante espectrofotometría de emisión atómica. En base a los resultados, se eligieron dos zonas experimentales representativas: Ledoy (0.130 ppm Cd) y Shima (0.630 ppm Cd).

Producción e instalación de plantones inoculados con HMA

El suelo utilizado para la producción de plantones se recolectó en Aucaloma, se tamizó y esterilizó (121 °C, 30 min, 3 días consecutivos). Las semillas de cacao CCN-51 se germinaron siguiendo metodologías adaptadas de Ferrás Negrín et al. (2022). A cada bolsa se incorporaron 1000 esporas del inóculo correspondiente. Las plantas permanecieron tres meses en vivero bajo condiciones de invernadero, con riego cada dos días.

Transcurrido este periodo, 48 plántulas de tres meses de edad se trasladaron a cada agroecosistema. Se realizó el trazado, limpieza, apertura de hoyos y plantación siguiendo el diseño experimental establecido (espaciamento 3 × 3 m).

Evaluaciones morfológicas y fisiológicas

Durante tres meses en campo, se evaluaron parámetros morfológicos quincenalmente, siguiendo las metodologías de Del Aguila et al. (2018) y Delgado Mera, (2023). La altura se midió con regla, el diámetro con vernier digital y el número de hojas mediante conteo directo. La clorofila se midió con SPAD-502 Plus y el contenido foliar de NPK en el Instituto de Cultivos Tropicales.

Colonización micorrízica y concentración de Cd en tejidos

Al finalizar el experimento, se tomaron muestras de raíces y hojas de tres plantas por tratamiento. El Cd se determinó en LABISAG (UNTRM) por espectrofotometría de emisión atómica. La colonización micorrízica

se evaluó mediante tinción y observación microscópica (Phillips & Hayman, 1970; Trouvelot et al., 1986). Las raíces se aclararon con KOH (10%) a 90 °C, se decoloraron con H₂O₂ 20 V, se tiñeron con tinta Parker y se conservaron en lactoglicerol antes de su observación (20X).

Caracterización fisicoquímica del suelo

Se determinaron las propiedades texturales, pH, CE, materia orgánica, N, P, K, CIC y cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺ + H⁺), siguiendo protocolos estándar en LABISAG. Esta caracterización permitió analizar la relación entre las propiedades edáficas y la absorción de Cd en plantas micorrizadas.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos se analizaron con el software R. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para detectar diferencias significativas entre tratamientos. Cuando se encontraron diferencias ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de Tukey (95 % de confianza) para identificar contrastes específicos. Los niveles de significancia se reportaron como $p < 0.05$ [], $p < 0.01$ [], y $p < 0.001$ [].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del sitio experimental y niveles iniciales de cadmio

El análisis de cadmio (Cd) realizado al inicio del experimento mostró concentraciones de 0.130 ppm en Ledoy (Bellavista) y 0.630 ppm en Shima (Saposoá). Aunque ambos valores se encuentran dentro del rango considerado moderado, la parcela de Shima presentó niveles más cercanos a los máximos reportados para la región San Martín. Estudios previos Santander Ruiz et al. (2021) reportaron concentraciones de Cd entre 0.214 y 0.980 ppm en suelos de cacao en cinco localidades de Bellavista y Huallaga, por lo que los valores de Shima representan un escenario de mayor estrés para el cultivo.

Estas diferencias permitieron evaluar el comportamiento de las plantas de cacao inoculadas con distintas especies y consorcios de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) bajo dos condiciones edáficas contrastantes.

Mortalidad de plantas de cacao bajo diferentes tratamientos micorrízicos

Se establecieron 12 unidades experimentales por tratamiento en cada plantación. En Ledoy no se registraron pérdidas durante los 90 días de evaluación. Sin embargo, en Shima se observó la muerte de 14 plantas distribuidas entre tratamientos: control (4), *Rhizoglyphus* *dunense* (4), *R. variabile* (2) y consorcio micorrízico (4).

La mayor mortalidad en Shima se asocia a la concentración más elevada de Cd. Según Irfan et al. (2013), el Cd induce la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno (ROS), provocando daño celular y muerte de tejidos. Esta respuesta concuerda con nuestros resultados, evidenciando un efecto fitotóxico más severo en suelos con mayor contenido de Cd.

Ganancia de altura

La ganancia de altura presentó diferencias significativas entre tratamientos micorrízicos. El análisis de Tukey mostró que *R. variabile* en Ledoy alcanzó la mayor ganancia (16.56 cm), seguida de *R. variabile* en Shima (15.63 cm) y *R. dunense* en Ledoy (13.76 cm). En contraste, el control en Shima presentó la menor ganancia (1.76 cm).

Estos resultados demuestran que la inoculación con HMA promueve un crecimiento más vigoroso incluso en suelos con niveles moderados de Cd, como también lo señalan Vallejos-Torres et al. (2022) y Aggangan et al. (2019). La simbiosis micorrízica mejora la absorción de nutrientes esenciales, reduce la translocación

de Cd hacia órganos aéreos y mitiga la fitotoxicidad, permitiendo un desarrollo más equilibrado en ambientes contaminados (Garg & Aggarwal, 2012; Irfan et al., 2013).

R. variabile mostró el mejor desempeño en ambas localidades, lo que resalta su potencial como inoculante eficiente bajo diferentes condiciones edáficas.

Área foliar y número de hojas

El área foliar estuvo significativamente influenciada por el tipo de inóculo ($p < 0.001$), pero no por la localidad. El consorcio micorrízico en Shima alcanzó el mayor valor promedio (142.32 cm^2), significativamente superior al control en ambos sitios. Este resultado es relevante porque evidencia que los HMA pueden contrarrestar los efectos negativos del Cd en el desarrollo foliar, favoreciendo la fotosíntesis y la regulación térmica de las plantas.

En cuanto al número de hojas, se observó un efecto significativo del lugar de plantación ($p = 0.002$), reflejando la influencia de la concentración de Cd. R. dunense en Shima presentó el mayor número promedio de hojas (20.75), superando significativamente al control en Ledoy (8.36).

Aunque la significancia global para el inóculo fue marginal ($p = 0.0597$), se observó una clara tendencia a un mayor número de hojas en tratamientos micorrízicos, lo cual concuerda con estudios en otros cultivos como Sacha Inchi (Delgado- Mera, 2023) y con metaanálisis recientes que destacan la mejora en biomasa y absorción de fósforo por efecto de HMA en suelos con Cd (Tan et al., 2025).

Ganancia de diámetro del tallo

La ganancia de diámetro fue significativamente influenciada por el inóculo ($p < 0.01$). R. variabile en Ledoy presentó el mayor incremento (5.24 mm), seguido por R. variabile en Shima (4.12 mm). Los controles registraron los valores más bajos (2.19 mm en Ledoy y 2.05 mm en Shima).

Estos resultados muestran que la micorrización mejora el desarrollo estructural del cacao, probablemente mediante un incremento en la exploración del sustrato y la absorción de nutrientes, tal como reportan Pérez Moncada et al. (2019). La respuesta más baja en Shima podría deberse a la reducción de la conductividad hidráulica en raíces inducida por Cd, afectando la expansión celular y el crecimiento (Ehlert et al., 2009).

Aunque se esperaba que el consorcio micorrízico tuviera el mejor desempeño, R. variabile resultó más eficaz, lo que sugiere una compatibilidad específica entre esta cepa y el cacao, y refuerza su potencial como inoculante estratégico en suelos contaminados.

Contenido de clorofila

El contenido de clorofila (unidades SPAD) mostró diferencias significativas tanto por efecto del inóculo como del lugar y el tratamiento. Los valores más altos correspondieron al consorcio micorrízico en Shima (40.32 SPAD), seguido por R. dunense y R. variabile en Shima. En contraste, el control en Shima registró el valor más bajo (24.55 SPAD), indicando un menor contenido de clorofila en plantas no micorrizadas.

La mayor concentración de Cd redujo el contenido de clorofila en controles, reflejando estrés fisiológico. Sin embargo, la micorrización compensó parcialmente este efecto, mejorando el estado nutricional y fotosintético de las plantas, coincidiendo con lo reportado por Tan et al. (2025).

Los resultados muestran que la micorrización con especies específicas, especialmente R. variabile, promueve mejoras significativas en el crecimiento y desarrollo morfológico del cacao, incluso bajo condiciones de contaminación moderada por Cd. Además, se observan diferencias en la respuesta según la especie de HMA y la localidad, lo que enfatiza la importancia de una selección adecuada del inoculante según las características edáficas y niveles de contaminación.

Tabla 2. Resultados de variables evaluadas

Tratamiento	Lugar	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Nº hojas	Diámetro (mm)	Clorofila (SPAD)	N (%)	P (%)	K (%)	Peso fresco raíz (g)	Peso seco raíz (g)	Peso fresco aéreo (g)	Peso seco aéreo (g)
<i>R. variable</i>	Ledoy	16.56 ± 2.60 a	128.23 ± 21.57 ab	12.25 ± 3.39 ab	5.24 ± 1.38 a	35.45 ± 5.02 ab	2.16 ± 0.09 a	0.29 ± 0.12 a	1.47 ± 0.38 a	16.81 ± 4.85 a	6.31 ± 1.51 a	39.10 ± 3.12 a	16.68 ± 0.55 ab
<i>R. variable</i>	Shima	15.63 ± 13.07 a	113.24 ± 27.61 abc	13.00 ± 5.12 ab	4.12 ± 0.39 ab	37.75 ± 8.54 ab	2.74 ± 0.26 a	0.25 ± 0.12 a	0.98 ± 0.84 a	13.04 ± 3.14 ab	4.68 ± 0.89 ab	40.96 ± 9.57 a	19.47 ± 4.90 a
<i>R. dunense</i>	Ledoy	13.76 ± 7.51 a	116.45 ± 35.49 ab	11.58 ± 4.54 b	3.55 ± 1.59 ab	33.30 ± 2.75 bc	2.23 ± 0.31 a	0.30 ± 0.04 a	1.65 ± 0.70 a	15.63 ± 3.17 a	5.71 ± 1.29 a	38.39 ± 5.61 a	17.01 ± 1.73 ab
<i>R. dunense</i>	Shima	10.10 ± 1.85 ab	115.39 ± 36.94 abc	20.75 ± 10.99 a	2.48 ± 1.29 ab	39.42 ± 4.92 ab	2.44 ± 0.21 a	0.26 ± 0.04 a	1.02 ± 0.16 a	16.12 ± 2.14 a	5.28 ± 0.28 a	40.72 ± 14.87 a	17.99 ± 4.69 ab
Consortio	Ledoy	13.06 ± 10.25 a	116.42 ± 11.01 abc	13.42 ± 2.61 ab	3.12 ± 0.71 ab	31.85 ± 1.96 bc	2.31 ± 0.20 a	0.29 ± 0.09 a	1.32 ± 0.61 a	14.87 ± 2.22 ab	5.09 ± 0.84 a	31.37 ± 10.32 a	13.78 ± 6.31 ab
Consortio	Shima	9.60 ± 0.36 ab	142.32 ± 15.36 a	14.25 ± 7.04 ab	2.37 ± 0.53 b	40.32 ± 2.87 a	2.64 ± 0.22 a	0.30 ± 0.12 a	1.46 ± 0.29 a	15.35 ± 1.87 ab	5.91 ± 0.69 a	37.41 ± 13.93 a	17.68 ± 6.14 ab
Control	Ledoy	6.43 ± 1.81 bc	79.85 ± 13.30 bc	8.36 ± 4.03 b	2.19 ± 0.86 b	26.31 ± 3.58 c	2.34 ± 0.35 a	0.27 ± 0.04 a	1.72 ± 0.41 a	11.14 ± 5.30 ab	3.61 ± 1.28 ab	21.82 ± 1.81 a	8.30 ± 0.77 ab
Control	Shima	1.76 ± 0.32 c	75.14 ± 8.14 c	15.50 ± 9.19 ab	2.05 ± 0.59 b	24.55 ± 2.25 c	2.68 ± 0.13 a	0.31 ± 0.03 a	1.56 ± 0.21 a	6.20 ± 1.26 b	2.17 ± 0.60 b	15.59 ± 2.68 a	6.89 ± 2.37 b

Colonización micorrízica y concentración de cadmio en raíces y hojas de plántulas de cacao

El estudio de la colonización micorrízica y la concentración de cadmio (Cd) en raíces y hojas de plántulas de cacao permitió evidenciar diferencias importantes entre los tratamientos micorrízicos y las localidades evaluadas. En la Tabla 3 se resumen las medias, desviaciones estándar y letras de significancia obtenidas mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$) para cada variable.

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias altamente significativas en el porcentaje de colonización micorrízica entre los tratamientos ($p < 0.001$), pero no entre localidades. *R. variable* presentó los mayores niveles de colonización en ambas localidades (84.97 % en Ledoy y 84.43 % en Shima), significativamente superiores a los controles. *R. dunense* y el consorcio micorrízico también mostraron niveles elevados de colonización, aunque con mayor variabilidad en Shima.

Los valores más altos de Cd en hojas y raíces se registraron en la localidad Shima para los tratamientos Control y *R. dunense*, superando 0.36 ppm en raíces y 0.21 ppm en hojas. Por el contrario, los valores más bajos correspondieron a *R. variable* y Consorcio 1 en Ledoy (≤ 0.0167 ppm). Aunque las diferencias no fueron significativas entre tratamientos, la tendencia indica que las inoculaciones micorrízicas, especialmente con *R. variable*, redujeron la acumulación de Cd en tejidos vegetales en comparación con el control.

Tabla 3. Resultados de Colonización micorrízica.

Tratamiento	Localidad	Colonización micorrízica (%)	Cd en raíces (ppm)	Cd en hojas (ppm)
R. variable	Ledoy	84.97 ± 7.64 a	0.005 ± 0.0000 b	0.0100 ± 0.0087 b
R. variable	Shima	84.43 ± 10.86 a	0.1500 ± 0.0889 ab	0.1333 ± 0.0153 ab
R. dunense	Ledoy	77.73 ± 18.30 a	0.005 ± 0.0000 b	0.0050 ± 0.0000 b
R. dunense	Shima	71.20 ± 25.81 a	0.3633 ± 0.2223 a	0.1467 ± 0.0945 a
Consorcio 1	Ledoy	72.20 ± 22.63 a	0.0167 ± 0.0202 b	0.0050 ± 0.0000 b
Consorcio 1	Shima	63.87 ± 3.59 ab	0.3367 ± 0.4038 a	0.1067 ± 0.1097 ab
Control	Ledoy	16.10 ± 5.35 bc	0.005 ± 0.0000 b	0.0050 ± 0.0000 b
Control	Shima	12.40 ± 6.24 c	0.3633 ± 0.2223 a	0.2117 ± 0.2574 a

El valor máximo de colonización micorrízica obtenido (84.97 %) fue superior a lo reportado por Gramlich et al. (2018), lo que sugiere una mayor eficiencia de simbiosis en el sistema evaluado. Este alto nivel de colonización podría estar influenciado por condiciones edáficas favorables (pH cercano a la neutralidad) y por la alta capacidad simbiótica de las especies utilizadas. Además, una colonización elevada podría estar relacionada con mecanismos de tolerancia al Cd, como la inmovilización en la rizosfera, la activación de respuestas antioxidantes y la mejora de la nutrición vegetal (Aggangan et al., 2019; Pérez Moncada et al., 2019).

En la parcela Ledoy se observó una clara reducción en la concentración de Cd en raíces y hojas en las plantas inoculadas con *R. variable* y el consorcio micorrízico, lo que sugiere que estos tratamientos podrían limitar la absorción y translocación del metal. Este comportamiento concuerda con estudios que destacan el rol de los HMA en la fitoestabilización, ya sea mediante inmovilización en la rizosfera, acumulación en estructuras fúngicas o inducción de mecanismos de exclusión (Irfan et al., 2013; Tchameni et al., 2011).

CONCLUSIONES

Los resultados del estudio demuestran que la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) constituye una estrategia eficaz para mejorar el crecimiento, la fisiología y la tolerancia al cadmio (Cd) en plántulas de cacao establecidas en suelos con niveles moderados de este metal. Aunque la localidad Shima presentó una mayor concentración inicial de Cd y registró mayor mortalidad y reducción en variables de crecimiento, la aplicación de HMA mitigó significativamente los efectos fitotóxicos en comparación con los controles no inoculados. Entre las especies evaluadas, *Rhizoglossum variable* mostró el mejor desempeño general, al promover mayor ganancia de altura y diámetro, elevados niveles de clorofila y el mayor porcentaje de colonización micorrízica en ambas localidades. Asimismo, se observó que los tratamientos micorrízicos tendieron a reducir la acumulación de Cd en raíces y hojas, especialmente en Ledoy, lo que sugiere un efecto de fitoestabilización asociado a la simbiosis. El consorcio micorrízico destacó en el incremento del área foliar y contenido de clorofila en Shima, evidenciando su potencial para favorecer la eficiencia fotosintética bajo estrés. En conjunto, los resultados confirman que la respuesta del cacao depende tanto de la especie de HMA utilizada como de las condiciones edáficas locales, resaltando la importancia de una selección adecuada del inoculante. En conclusión, la micorrización, particularmente con *R. variable*, representa una alternativa biotecnológica prometedora para mejorar el establecimiento y desempeño temprano del cultivo de cacao en suelos contaminados con Cd. Su implementación podría contribuir al manejo sostenible de plantaciones en regiones afectadas por este metal, reduciendo riesgos para la productividad y calidad de los cultivos.

FINANCIAMIENTO

El presente trabajo de investigación, fue financiado por el instituto de investigación de la Universidad Nacional de San Martín en el año 2023 con Resolución N° 495-2023-UNSM/CU-R.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

1. Conceptualización: Daniel Lister Cueva Paredes, María Nelly Pezo Torres
2. Curación de datos: Mike Anderson Corazon Guivin, María Nelly Pezo Torres
3. Análisis formal: Mike Anderson Corazon Guivin
4. Adquisición de fondos: Mike Anderson Corazon Guivin
5. Investigación: Daniel Lister Cueva Paredes, María Nelly Pezo Torres
6. Metodología: Daniel Lister Cueva Paredes
7. Recursos: Mike Anderson Corazon Guivin
8. Software: María Nelly Pezo Torres
9. Supervisión: Mike Anderson Corazon Guivin
10. Validación: Mike Anderson Corazon Guivin
11. Visualización: Mike Anderson Corazon Guivin
12. Redacción - borrador original: Daniel Lister Cueva Paredes, Mike Anderson Corazon Guivin, María Nelly Pezo Torres
13. Redacción - revisión y edición: Daniel Lister Cueva Paredes, Mike Anderson Corazon Guivin, María Nelly Pezo Torres

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aggangan, N. S., Cortes, A. D., & Reaño, C. E. (2019). Growth response of cacao (*Theobroma cacao* L.) plant as affected by bamboo biochar and arbuscular mycorrhizal fungi in sterilized and unsterilized soil. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101347. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101347>
- Anetor, G. O., Nwobi, N. L., Igharo, G. O., Sonuga, O. O., & Anetor, J. I. (2022). Environmental Pollutants and Oxidative Stress in Terrestrial and Aquatic Organisms: Examination of the Total Picture and Implications for Human Health. *Frontiers in Physiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.931386>
- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., & He, Z. L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*, 605–606, 792–800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>
- Bennett, A. E., & Groten, K. (2022). The Costs and Benefits of Plant–Arbuscular Mycorrhizal Fungal Interactions. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), 649–672. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-124504>
- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 220(4), 1108–1115. <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Del Aguila, K. M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L. A., & Becerra, A. G. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrícicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137–146. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>

- Delgado Mera, E. (2023). *Efecto protector de hongos micorrícicos arbusculares sobre la pudrición de la raíz causada por Fusarium verticillioides en Plukenetia volubilis L.* Universidad Nacional de San Martín.
- Ehlert, C., Maurel, C., Tardieu, F., & Simonneau, T. (2009). Aquaporin-Mediated Reduction in Maize Root Hydraulic Conductivity Impacts Cell Turgor and Leaf Elongation Even without Changing Transpiration. *Plant Physiology*, 150(2), 1093–1104. <https://doi.org/10.1104/pp.108.131458>
- Ferrás Negrín, Y., Bustamante González, C. A., & Ortiz Gómez, N. (2022). Pseudomona sp en la emergencia de semillas y el desarrollo de posturas de cacao. *Agronomía Costarricense*. <https://doi.org/10.15517/rac.v46i1.49873>
- Ferreira Vilela, L. A., & Barbosa, M. V. (2019). Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Promoting Cadmium Tolerance in Plants. In *Cadmium Tolerance in Plants* (pp. 553–586). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815794-7.00021-7>
- Florida Rofner, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (Theobroma cacao L.). *La Granja*, 34(2), 117–130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>
- Garg, N., & Aggarwal, N. (2012). Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of Cajanus cajan (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. *Plant Growth Regulation*, 66(1), 9–26. <https://doi.org/10.1007/s10725-011-9624-8>
- Ghasemi Siani, N., Fallah, S., Pokhrel, L. R., & Rostamnejadi, A. (2017). Natural amelioration of Zinc oxide nanoparticle toxicity in fenugreek (Trigonella foenum-gracum) by arbuscular mycorrhizal (Glomus intraradices) secretion of glomalin. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.001>
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulin, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612, 370–378. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>
- Huamani-Yupanqui, H. A., Huauya-Rojas, M. A., Mansilla-Minaya, L. G., Florida-Rofner, N., & Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presencia de Metales pesados en el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) orgánico. *Acta Agronomica*, 61(4), 339–344. <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169926831006.pdf>
- Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., & Alyemeni, M. N. (2013). Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.11.004>
- Mendoza-López, K. L., Mostacero-León, J., López-Medina, S. E., Efraín Gil-Rivero, A., De La Cruz-Castillo, A. J., & Villena-Zapata, L. (2021). Cadmium in Theobroma cacao L. “cacao” plantations in the San Martin region (Lamas), Peru. *Manglar*, 18(2), 169–173. <https://doi.org/10.17268/manglar.2021.022>
- MIDAGRI. (2024). *El agro en cifras – Agosto 2024. Dirección General de Estadística, Seguimiento y Evaluación de Políticas (DGESEP)*. [https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1814/1/El Agro en Cifras agosto-2024.pdf](https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1814/1/El%20Agro%20en%20Cifras%20agosto-2024.pdf)
- Paredes-Vilca, O. J., Jiménez Díaz, L., Dávila García, J., & Apaza Cruz, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 56–66. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.594>
- Pérez Moncada, U. A., Ramírez Gómez, M. 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). *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 37(2), 121.

<https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>

- Santander Ruiz, W., Garay Montes, R., Verde Girbau, C., & Mendieta Taboada, O. (2021). Determinación del contenido de cadmio en suelos, frutos, granos fermentados y secos, licor de cacao y chocolate en zonas productoras de la región San Martín. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>
- Tan, Q., Wei, R., Hu, H., & Guo, Q. (2025). *Role of arbuscular mycorrhizal fungi behind the plant ameliorated tolerance against cadmium stress: A global meta-analysis*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-6946>
- Tchameni, S. N., Ngonkeu, M. E. L., Begoude, B. A. D., Wakam Nana, L., Fokom, R., Owona, A. D., Mbarga, J. B., Tchana, T., Tondje, P. R., Etoa, F. X., & Kuaté, J. (2011). Effect of *Trichoderma asperellum* and arbuscular mycorrhizal fungi on cacao growth and resistance against black pod disease. *Crop Protection*, 30(10), 1321–1327. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.05.003>
- Vallejos-Torres, G., Torres, S. C., Gaona-Jimenez, N., Saavedra, J., Tuesta, J. C., Tuesta, O. A., Becerra, A. G., Marín, C., & del Mar Alguacil, M. (2022). The Combined Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Compost Improves Growth and Soil Parameters and Decreases Cadmium Absorption in Cacao (*Theobroma cacao* L.) Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(4), 5174–5182. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00992-9>
- van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406–1423. <https://doi.org/10.1111/nph.13288>