



Micorrizas arbusculares y *Trichoderma* spp. en la mitigación del cadmio en cacao

Arbuscular mycorrhizae and *Trichoderma* spp. in cadmium mitigation in cacao

Autores

¹Angela Leonor Palacios Cedeño

✉ apalacios1205@utm.edu.ec



²*Edisson Wilfrido Cuenca-Cuenca

✉ edisson.cuenca@utm.edu.ec



¹Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Posgrado, Maestría con Trayectoria Profesional en Agronomía, Mención Producción Agrícola Sostenible, Avenida Urbina, Apartado Postal 130105, Portoviejo, Ecuador.

²Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ingenierías Agroambientales, Departamento de Ciencias Agronómicas, Portoviejo-Santa Ana, Lodana, Ecuador.

*Autor de correspondencia.

Resumen

La acumulación de cadmio (Cd) en las almendras de cacao tiene un impacto significativo en la inocuidad, sostenibilidad y competitividad de la cadena cacaotera en Ecuador, especialmente en mercados que imponen límites para el chocolate y sus derivados. Esta revisión crítica y narrativa se centró en la evidencia sobre los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma* spp. como herramientas biológicas para modificar la biodisponibilidad, absorción y transferencia de Cd en *Theobroma cacao* L. La búsqueda se actualizó hasta septiembre de 2026, y el análisis se basó en 47 estudios primarios y 17 referencias adicionales. La evidencia fue más sólida para los HMA, aunque fue importante distinguir entre la reducción de la concentración de Cd, la menor translocación y la dilución por crecimiento. En cuanto a *Trichoderma* spp., la información sigue siendo escasa, pero ya incluye ensayos controlados en plantas de cacao que muestran respuestas que dependen de la cepa; sin embargo, aún se necesitan validaciones en campo y en las almendras. La aplicación agronómica debe integrar un diagnóstico del suelo, el uso de materiales de baja acumulación, un manejo adecuado de la fertilidad, evaluaciones en múltiples sitios y cosechas, así como la verificación de Cd en almendras tanto fermentadas como secas, sin olvidar considerar los costos, la calidad del grano y la persistencia del efecto microbiano.

Palabras clave: biorremediación, inocuidad alimentaria, rizósfera, metales pesados, agroecosistemas tropicales.

Abstract

The accumulation of cadmium (Cd) in cocoa beans has a significant impact on the safety, sustainability, and competitiveness of the cocoa supply chain in Ecuador, especially in markets that impose limits on chocolate and its derivatives. This critical and narrative review focuses on the evidence regarding arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and *Trichoderma* spp. as biological tools for modifying the bioavailability, absorption, and transfer of Cd in *Theobroma cacao* L. The search was updated through September 2026, and the analysis is based on 47 primary studies and 17 additional references. The evidence is stronger for ARMs, although it was important to distinguish between reduced Cd concentration, decreased translocation, and dilution through growth. Regarding *Trichoderma* spp., information remains limited but already includes controlled trials on cocoa plants showing strain-dependent responses; however, field validations and tests on cocoa beans are still needed. Agronomic application should incorporate soil diagnosis, the use of low-accumulation materials, proper fertility management, evaluations across multiple sites and harvests, as well as Cd testing in both fermented and dried almonds, while also considering costs, bean quality, and the persistence of the microbial effect.

Keywords: bioremediation, food safety, rhizosphere, heavy metals, tropical agroecosystems.

Citación sugerida: Palacios Cedeño, A. L., Cuenca-Cuenca, E. W. (2026). Micorrizas arbusculares y *Trichoderma* spp. en la mitigación del cadmio en cacao. *La Técnica*, 16(2), 105-116. DOI: <https://doi.org/10.33936/latecnica.v16i1.8554>

Recibido: Julio 16, 2026

Aceptado: Octubre 08, 2026

Publicado: Octubre 20, 2026



Introducción

El cacao es un cultivo clave para Ecuador, ya que contribuye a la economía rural, genera empleo y posiciona al país en el competitivo mercado del cacao fino (Chavez et al., 2015; Argüello et al., 2019). Sin embargo, la acumulación de cadmio (Cd) en las almendras se ha convertido en un obstáculo para su comercialización y plantea serios problemas de seguridad alimentaria. Esto se debe a que el metal puede transferirse del suelo a los tejidos de la planta y, finalmente, al grano (Chavez et al., 2015; Vanderschueren et al., 2021). El Cd puede tener orígenes geogénicos o ser resultado de actividades humanas, y puede permanecer en el suelo durante largos períodos, siendo absorbido por el cacao incluso cuando la planta no presenta síntomas visibles de toxicidad (Smolders y Mertens, 2013; Kubier et al., 2019).

La normativa europea actual establece límites máximos de $0,10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para ciertas categorías de chocolate con leche, $0,30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para chocolate que contiene niveles intermedios de sólidos de cacao, $0,80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para chocolate que tiene un 50% o más de sólidos de cacao, y $0,60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ para el cacao en polvo que se destina al consumidor final (European Commission, 2023). Además, el *Codex Alimentarius* cuenta con un código de prácticas diseñado para prevenir y reducir la contaminación por Cd desde la producción inicial hasta el proceso de transformación (Codex Alimentarius Commission, 2022). Estas regulaciones se implementan en respuesta a la exposición dietética y a los efectos crónicos que puede tener este metal, especialmente en los riñones, los huesos y otros sistemas biológicos (World Health Organization, 2011; European Food Safety Authority, 2012).

El contenido de Cd en el grano no se determina solo por la cantidad total de metal presente en el suelo. En el caso del cacao, su acumulación está afectada por varios factores como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, la textura del suelo, así como los óxidos de hierro y manganeso, la disponibilidad de nutrientes, la edad de la planta y el tipo de material vegetal utilizado (Chavez et al., 2015; Gramlich et al., 2018; Argüello et al., 2019). Esta variabilidad entre diferentes suelos, fincas y genotipos es la razón por la que una sola medición rara vez asegura resultados consistentes. De hecho, los ensayos de campo que han utilizado enmiendas han mostrado reducciones en la cantidad de Cd disponible o en las hojas, pero no siempre se observa una disminución inmediata y constante en las almendras (Ramtahal et al., 2019; Argüello et al., 2023).

Entre las opciones para mitigar problemas, el uso de microorganismos beneficiosos se presenta como una alternativa interesante, especialmente por su armonía con el manejo biológico del suelo. Los hongos micorrízicos arbusculares

(HMA) tienen la capacidad de extender la exploración de las raíces, alterar la rizósfera y mejorar tanto la nutrición como la resistencia al estrés. Sin embargo, su impacto sobre el cadmio (Cd) varía según el tipo de hongo, la planta y el suelo (Ferrol et al., 2016; Begum et al., 2019). En el cultivo de cacao, se han observado resultados positivos con HMA nativos, así como con HMA combinados con compost y tratamientos de campo que lograron reducir los niveles de Cd en las almendras (Pérez-Moncada et al., 2019; Vallejos-Torres et al., 2022; Vega-Jara et al., 2025). Por otro lado, *Trichoderma* spp. incluye cepas que no solo promueven el crecimiento, sino que también responden al estrés (Shoresh et al., 2010; Hermosa et al., 2012), además de mostrar tolerancia, biosorción y bioacumulación de metales (Mohsenzadeh y Shahrokhi, 2014; Nongmaithem et al., 2016). En el caso del cacao, la evidencia directa aún es escasa: se ha realizado una selección *in vitro* de cepas nativas (Cayotopa-Torres et al., 2021) y un ensayo controlado en CCN51 que reveló respuestas dependientes de la cepa, incluyendo reducciones de Cd en el tallo con *T. longibrachiatum* UCF17-M4 y *Trichoderma* sp. UCPF2-C1 (Malca-Cerna et al., 2025). Sin embargo, aún se necesitan validaciones en campo y en las almendras.

Esta revisión tuvo como objetivo analizar cómo los HMA y *Trichoderma* spp. pueden contribuir a disminuir la acumulación de Cd en cacao, considerando que la evidencia disponible no es igual para ambos grupos microbianos. También se revisa su posible uso junto con otras prácticas agronómicas y las principales limitaciones que todavía deben superarse antes de plantear su aplicación de manera más amplia en las zonas productoras de cacao del Ecuador.

Metodología

Se llevó a cabo una revisión crítica y narrativa sobre la presencia y acumulación de cadmio (Cd) en el cacao (*Theobroma cacao* L.), así como el posible papel que juegan los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma* spp. en su mitigación. Esta revisión abordó tres preguntas clave: (i) ¿qué evidencia existe sobre HMA-Cd en cacao?; (ii) ¿qué respaldo directo e indirecto existe para *Trichoderma* spp.?; y (iii) ¿qué factores condicionan la aplicabilidad de ambas estrategias?. Se integraron estudios de campo, condiciones controladas, investigaciones *in vitro* y literatura mecanística, teniendo en cuenta aspectos como el diseño, el genotipo, los microorganismos, las condiciones del suelo y las variables de respuesta.

La búsqueda bibliográfica se realizó durante la elaboración inicial del manuscrito y se actualizó entre el 24 y el 30 de septiembre de 2026 en Scopus, Web of Science Core Collection, PubMed, ScienceDirect, Springer Nature Link, SciELO y Redalyc; Google Scholar se utilizó como fuente complementaria. Se consideró

literatura publicada entre 2010 y 2026. La búsqueda se estructuró en cinco grupos temáticos (Q1 - Q5), a continuación, se presentan sus ecuaciones generales (tabla 1). Cada una de ellas se ajustó a la sintaxis y a los campos que se encuentran disponibles en las diferentes plataformas.

Tabla 1. Estrategias generales de búsqueda bibliográfica y trazabilidad.

Código	Estrategia de búsqueda
Q1	("Theobroma cacao" OR cacao OR cocoa) AND (cadmium OR cadmio)
Q2	("Theobroma cacao" OR cacao OR cocoa) AND (cadmium OR cadmio) AND ("arbuscular mycorrhizal fungi" OR "arbuscular mycorrhiza" OR "hongos micorrízicos arbusculares")
Q3	("Theobroma cacao" OR cacao OR cocoa) AND (cadmium OR cadmio) AND <i>Trichoderma</i>
Q4	(cadmium OR cadmio) AND ("arbuscular mycorrhizal fungi" OR "arbuscular mycorrhiza") AND (biosorption OR bioaccumulation OR immobilization OR phytostabilization OR translocation OR uptake OR glomalin OR tolerance OR bioremediation)
Q5	(cadmium OR cadmio) AND <i>Trichoderma</i> AND (biosorption OR bioaccumulation OR tolerance OR bioremediation OR phytostabilization OR translocation OR uptake)

Registros recuperados (Q1/Q2/Q3/Q4/Q5): Scopus 338/11/4/517/130; Web of Science 330/10/7/793/147; PubMed 119/1/2/165/44; ScienceDirect 90/0/0/166/47.

Registros recuperados (continuación): Springer Nature Link 1125/94/135/1869/2138; SciELO 36/3/1/4/0; Redalyc 109/8/10/31/26; Google Scholar ≈17500/1460/1670/21700/17400 (búsqueda complementaria; conteos aproximados).

Depuración y fuerza de la evidencia: los conteos brutos no se sumaron por el solapamiento entre ecuaciones y plataformas. Dentro del corpus curado, los duplicados se identificaron prioritariamente por DOI y se verificaron por coincidencia de título, año y primer autor, con revisión manual de discrepancias; no se detectaron duplicados por DOI. La evidencia se jerarquizó como alta (Cd en almendras bajo condiciones de campo), moderada (cacao en vivero/invernadero), baja (asociaciones observacionales), preliminar (biosorción o tolerancia *in vitro*) e indirecta (otros cultivos o sistemas).

Las ecuaciones se aplicaron sobre TITLE-ABS-KEY en Scopus, Topic en Web of Science, Title/Abstract en PubMed y título, resumen y palabras clave en ScienceDirect; en SciELO se combinaron Título y Resumen y en las demás fuentes se utilizaron los campos equivalentes disponibles. Google Scholar se empleó únicamente como fuente complementaria.

Se incluyeron artículos revisados por pares que proporcionaron información sobre el cadmio en el cacao, así como sobre los mecanismos a través de los cuales HMA o *Trichoderma* influyeron en su disponibilidad, absorción, translocación o acumulación. Solo se conservaron los estudios realizados en otros cultivos o en sistemas *in vitro* que ofrecieron evidencia mecanística relevante, considerándolos como evidencia indirecta. Se descartaron publicaciones anteriores a 2010, registros que no presentaban resultados específicos sobre el cadmio, trabajos que no eran lo suficientemente relevantes y documentos de congresos.

El *corpus* que se utilizó para la síntesis se compuso de 47 estudios primarios y 17 referencias adicionales. De estos estudios primarios, 30 se centraron en el contexto del Cd-cacao, mientras que 10 fueron investigaciones directas u observacionales sobre la relación entre HMA y Cd en cacao. También se incluyeron dos estudios sobre *Trichoderma* que estuvieron directamente relacionados con el cacao y cinco investigaciones que abordaron aspectos mecanísticos indirectos de la interacción entre *Trichoderma* y Cd. La síntesis se llevó a cabo de manera narrativa y comparativa, priorizando los estudios que se realizaron específicamente en cacao, y dentro de estos, aquellos que midieron la concentración de Cd en tejidos o almendras. No se realizó un metaanálisis debido a la diversidad en los diseños, genotipos, inóculos, concentraciones de Cd, condiciones experimentales y variables de respuesta.

Desarrollo y discusión

Cadmio en los sistemas cacaoteros

Fuentes, disponibilidad y comportamiento en el suelo

El Cd puede provenir del material parental o entrar al suelo a través de fertilizantes fosfatados, deposición atmosférica, actividades mineras, riego con agua contaminada y desechos industriales. Su riesgo agronómico se basa principalmente en la fracción que está disponible. En condiciones ácidas, la actividad del Cd²⁺ en la solución tiende a aumentar; por otro lado, un pH más alto y la adsorción en arcillas, óxidos y materia orgánica suelen reducir su movilidad (Smolders y Mertens, 2013; Kubier et al., 2019). Además, la nutrición y las interacciones con otros elementos influyeron en la absorción y la respuesta fisiológica de las plantas (Zhu et al., 2023; Xin, 2024).

La rizósfera añade otra capa de complejidad. Los exudados de las raíces, la respiración de los microorganismos y la descomposición de residuos pueden alterar localmente el pH, la especiación y la disponibilidad del metal. Por esta razón, el Cd total no es suficiente para predecir el Cd en los granos y debe complementarse con indicadores de disponibilidad, propiedades del suelo y características del cultivo (Chavez et al., 2015, Argüello et al., 2019).

Distribución regional y relación suelo-planta

La presencia de cadmio (Cd) en el cacao ha sido documentada en varios países como Ecuador, Perú, Colombia, Costa Rica, Honduras y Trinidad y Tobago. En Ecuador, se han encontrado



conexiones entre el Cd en los granos, el pH y otras características del suelo, aunque con una notable variabilidad entre diferentes lugares (Chavez et al., 2015; Barraza et al., 2017; Argüello et al., 2019; Espinoza-Echeverría et al., 2023). Además, el análisis isotópico ha revelado que los procesos de fraccionamiento pueden ofrecer pistas sobre el origen y la transferencia de este metal en el sistema suelo-cacao (Barraza et al., 2019).

En Honduras, Perú y Costa Rica, se ha notado una relación variable entre el Cd disponible, los tejidos vegetativos y las almendras, lo que sugirió que la transferencia dependió del entorno, del tipo de planta y del sistema de manejo utilizado (Arévalo-Gardini et al., 2017; Gramlich et al., 2017; Gramlich et al., 2018; Zug et al., 2019; Oliva et al., 2020; Carrillo et al., 2023; Thomas et al., 2023). En Colombia, tanto los estudios nacionales como regionales han señalado áreas con mayor riesgo y diferencias en la concentración de Cd entre el suelo, la hojarasca, las hojas y los granos (Bravo et al., 2021; Gil et al., 2022; Joya-Barrero et al., 2023; Bravo et al., 2024; Guarín et al., 2024). Por otro lado, en Trinidad y Tobago, la distribución de Cd entre los tejidos y el suelo ha demostrado que el cacao puede acumular este metal sin que haya una relación lineal con la concentración total en el suelo (Ramtahal et al., 2016).

Absorción, translocación y variación genética

El Cd utiliza transportadores que normalmente se encargan de la absorción de nutrientes esenciales. Una vez que llega a la raíz, puede quedarse ahí, almacenarse en vacuolas o moverse a través del xilema. Luego, una parte puede redistribuirse mediante el floema hacia los frutos y semillas. Investigaciones con trazadores han demostrado que la forma en que se absorbió y redistribuyó cambió a medida que la planta se desarrolló (Vanderschueren et al., 2023). Además, la interacción con hierro, zinc, manganeso y calcio afectó la entrada, la complejación y el transporte del metal (Moore et al., 2024; Letort et al., 2025).

La variación genética jugó un papel fundamental. Los patrones de raíces y las combinaciones de injerto-portainjerto variaron en cuanto a absorción, asignación y tolerancia al Cd, por lo que fue crucial seleccionar materiales de baja acumulación junto con las estrategias de manejo del suelo (Fernández-Paz et al., 2021; de Almeida et al., 2022). Los análisis proteómicos han revelado respuestas diferentes entre combinaciones tolerantes y susceptibles, lo que indicó que la tolerancia fisiológica y la concentración en el grano no siempre estuvieron vinculadas al mismo mecanismo (Oliveira et al., 2022; de Almeida et al., 2023).

Efectos fisiológicos y respuestas de mitigación

El cadmio no tiene una función biológica esencial y puede causar estrés oxidativo, afectar las membranas, la fotosíntesis, el crecimiento de las raíces y el equilibrio nutricional. Las plantas reaccionaron a esto a través de procesos como la quelación, la compartimentación, la activación de sistemas antioxidantes y ajustes en la expresión de transportadores (Clemens y Ma, 2016; Haider et al., 2021; Ortiz-Álvarez et al., 2023). Aunque estas respuestas pueden mejorar la tolerancia fisiológica, no garantizan por sí solas una reducción en la transferencia de cadmio al tejido comestible.

En el cultivo de cacao, se han probado enmiendas como zinc, manganeso, encalado, yeso, compost y biochar. El zinc y el manganeso mitigaron algunos efectos fisiológicos y alterar la absorción, mientras que la efectividad de las enmiendas del suelo varió según la dosis, el pH inicial, la capacidad de intercambio y el tiempo de reacción (Ramtahal et al., 2019; dos Santos et al., 2020; Oliveira et al., 2020). Los ensayos de campo en Ecuador han demostrado que aumentar el pH puede reducir el cadmio en las hojas, pero la disminución del cadmio en los granos no siempre fue inmediata o consistente (Argüello et al., 2023; López et al., 2023). Esta variabilidad resaltó la importancia de integrar microorganismos, material vegetal y un manejo adecuado del suelo, en lugar de depender de soluciones aisladas (Vanderschueren et al., 2021; García Porras et al., 2025).

Hongos micorrízicos arbusculares y mitigación del cadmio

Bases de la simbiosis

Los HMA establecen relaciones de mutualismo con las raíces, creando una red de hifas extrarradicales que amplía el área del suelo que pueden explorar. La planta proporcionó carbono, mientras que el hongo ayudó a la planta a absorber fósforo y otros nutrientes esenciales. La efectividad de esta interacción varió según el tipo de hongo, la planta anfitriona, la fertilidad del suelo, las prácticas de manejo y las condiciones ambientales. En situaciones de estrés, esta simbiosis mejoró la nutrición, el equilibrio hídrico y la capacidad antioxidante de la planta (Ferrol et al., 2016; Begum et al., 2019).

Mecanismos de inmovilización y tolerancia

Los HMA tienen la capacidad de alterar la transferencia de Cd al retenerlo en estructuras fúngicas y raíces colonizadas, así como a través de cambios en la rizósfera y la regulación del transporte. Sin embargo, también se han observado casos donde hay menos translocación, mayor absorción total o dilución debido al crecimiento. Por lo tanto, una disminución en la concentración no debe ser interpretada automáticamente como una reducción en el contenido total de Cd (Ferrol et al., 2016).

Las proteínas del suelo asociadas con la glomalina han mostrado una relación con la agregación y retención de metales, aunque es importante tener cuidado al interpretarlas, ya que algunas fracciones pueden incluir componentes que se extraen junto con ellas. En el caso del cacao, estas variables se han vinculado a la actividad micorrízica y a procesos de retención en condiciones de campo, pero esto no prueba por sí solo la causalidad ni la eliminación del metal del sistema (Luis-Alaya et al., 2023).

Evidencia específica en cacao

En las plantas jóvenes de cacao, se observó que la inoculación con HMA nativos ayudó a reducir la acumulación de Cd en diferentes partes de la planta, con respuestas que variaban según el consorcio utilizado (Pérez-Moncada et al., 2019). La combinación de HMA con compost no solo disminuyó la absorción de Cd, sino que también favoreció el crecimiento, aunque el diseño del estudio no permitió atribuir todo el efecto al componente micorrízico (Vallejos-Torres et al., 2022). En un vivero, Lafont-Quíñonez et al. (2025) notaron mejoras tanto fisiológicas como de crecimiento en condiciones de estrés por Cd, lo que debe interpretarse como una señal de tolerancia y no como una prueba de menor Cd en las almendras. En condiciones controladas, Vallejos-Torres et al. (2026) reportaron niveles más bajos de Cd en los tallos de cacao y en el suelo con HMA, mientras que Cueva-Paredes et al. (2026) observaron tendencias a la baja en Cd, aunque sin diferencias significativas.

Los estudios observacionales también indicaron que la presencia y composición de HMA variaron con el nivel de Cd, el sistema de producción y otros factores del suelo, pero estas asociaciones no demostraron un efecto causal en la mitigación (Sandoval-Pineda et al., 2020; Luis-Alaya et al., 2023; Vallejos-Torres et al., 2023; del Aguila-Torres et al., 2026). La evidencia más contundente provino del ensayo de campo de Vega-Jara et al. (2025), donde la aplicación individual de HMA logró reducir el Cd en un 40,43% en las almendras después de seis meses; sin embargo, las concentraciones aún se mantuvieron por encima de los límites comerciales, lo que sugirió la necesidad de un seguimiento a largo plazo.

Factores que condicionan la eficiencia

Además de la inoculación, la eficiencia operativa de HMA se basó en conseguir una colonización funcional entre las comunidades microbianas que ya estuvieron presentes, así como en la fertilización con fósforo, las variaciones del pH y la competencia por el espacio en las raíces. En el caso del cacao, un consorcio que funcionó bien en el vivero perdió su efectividad en el campo cuando el inóculo no se mantuvo o las condiciones del suelo disminuyeron la actividad micorrízica. Por eso, es fundamental que la selección priorice consorcios locales, la identificación taxonómica, la concentración de propágulos, la compatibilidad con genotipos que acumulan poco y la evidencia de reducción del Cd en las almendras.

Trichoderma spp. y su potencial frente al cadmio

Características ecológicas y agronómicas

Trichoderma spp. incluye hongos filamentosos que crecen rápidamente y se establecen en el suelo, en residuos orgánicos y en las raíces de las plantas. Algunas cepas fueron verdaderos aliados, actuando como antagonistas de patógenos y fomentando el crecimiento a través de la competencia, la producción de metabolitos, enzimas, la modulación hormonal y la activación de respuestas defensivas (Shoresh et al., 2010; Hermosa et al., 2012). Es importante destacar que estas funciones son específicas de cada cepa y no se pueden aplicar a todo el género de manera general.

Tolerancia, biosorción y bioacumulación

La pared celular de los hongos tiene grupos funcionales que pueden unirse a cationes metálicos. La biosorción puede suceder tanto en biomasa viva como inactiva, y no siempre necesita un metabolismo activo. Por otro lado, la bioacumulación implica el transporte y la incorporación de metales dentro de las células. En medios líquidos, especies como *T. asperellum*, *T. harzianum* y *T. tomentosum* lograron eliminar Cd con una eficiencia que varió según el pH, la concentración y la especie (Mohsenzadeh y Shahrokhi, 2014). Otros aislamientos de *Trichoderma* también mostraron tolerancia y capacidad para biosorber Ni y Cd, lo que indicó una notable variación entre cepas (Nongmaithem et al., 2016).

Los estudios moleculares han revelado que *T. harzianum* activó rutas relacionadas con la homeostasis celular, el transporte vesicular, y el metabolismo del azufre y el glutatión en respuesta al Cd (Oshiquiri et al., 2020). En evaluaciones con diferentes especies, se observó que la remoción disminuyó al aumentar la concentración del metal, lo que sugirió que los resultados obtenidos a dosis bajas no deben aplicarse a suelos con alta contaminación (Yaghoubian et al., 2019).

Evidencia en cacao y otros cultivos

En el mundo del cacao, se han encontrado cepas nativas aisladas de la rizósfera que muestran una notable tolerancia y capacidad para eliminar Cd en condiciones *in vitro*, como fueron *T. brevicompactum*, *T. harzianum* y *T. spirale* (Cayotopa-Torres et al., 2021). Más adelante, Malca-Cerna et al. (2025) llevaron a cabo una evaluación de 12 cepas en ensayos *in vitro* y en plantas CCN51, donde *T. longibrachiatum* UCF17-M4 y *Trichoderma* sp. UCPF2-C1 lograron reducir de manera significativa el Cd en el tallo, mientras que otras cepas, curiosamente, aumentaron su absorción. Este hallazgo resaltó que la capacidad de remoción *in vitro* no siempre se tradujo en un comportamiento similar en las plantas, lo que sugirió que cada cepa debe ser evaluada individualmente.

Aunque la evidencia en cultivos es escasa, hay indicios sugestivos. En el caso del frijol de hortaliza cultivado en suelo irrigado con aguas residuales, la inoculación con *Trichoderma* spp. resultó en una disminución de la concentración de ciertos metales en



el tejido y del Cd en el grano en algunos tratamientos (Landeró-Valenzuela et al., 2024). Si bien estos resultados respaldaron la investigación en cacao, las diferencias en la especie de planta, la estructura de la raíz, la duración del ciclo y el destino del tejido comestible hacen que no se pueda extrapolar directamente.

Riesgos de interpretación y requisitos para su uso

La efectividad de *Trichoderma* spp. está influenciada por varios factores como el pH, la humedad, la cantidad de materia orgánica, la concentración de metales, la competencia entre microorganismos y la fuente de carbono. Es importante destacar que el hecho de que una cepa acumule Cd en su biomasa no implica que el metal haya sido eliminado del agroecosistema; de hecho, podría liberarse nuevamente en la solución del suelo tras la muerte del micelio. En lo que respecta a los ensayos, es fundamental incluir pruebas de colonización y persistencia, así como evaluar la disponibilidad de Cd, la concentración de Cd en raíces, hojas y almendras, y también el rendimiento y la estabilidad a lo largo de varias cosechas.

En la Figura 1 se muestran los posibles mecanismos mediante los cuales los HMA y *Trichoderma* spp. pueden contribuir a reducir el Cd en cacao, así como las diferencias en la evidencia científica disponible para cada grupo de hongos.

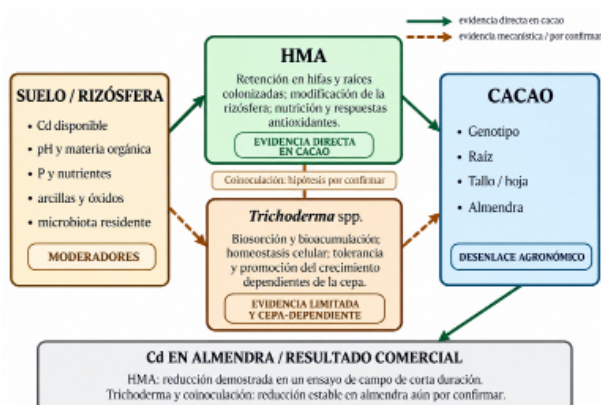


Figura 1. Mecanismos potenciales y nivel de evidencia para la mitigación del cadmio por HMA y *Trichoderma* spp. en la rizósfera del cacao.

Síntesis comparativa e integración agronómica

Nivel de evidencia disponible

Los HMA tienen evidencia directa en cacao que proviene de viveros, condiciones controladas y el campo, incluyendo una reducción de Cd en almendras en un ensayo de corta duración.

En cuanto a *Trichoderma* spp., la evidencia específica fue más limitada: hay resultados in vitro y un ensayo controlado en plantas de cacao que mostraron respuestas claramente dependientes de la cepa, pero aún no se ha comprobado una reducción constante de Cd en almendras en condiciones de campo. Esta falta de simetría conlleva a ser cautelosos al hacer afirmaciones equivalentes sobre su eficacia. En la tabla 2 se presentan los principales estudios sobre HMA y *Trichoderma* spp. frente al Cd, con sus resultados y las limitaciones que deben considerarse al evaluar su aplicación en cacao.

Coinoculación y compatibilidad

La coinoculación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y *Trichoderma* spp. resulta bastante interesante, ya que puede ayudar en la exploración del suelo, estabilizar la rizósfera, mejorar el crecimiento y facilitar la retención de metales por parte de los hongos. Sin embargo, hasta ahora no hay pruebas definitivas que demuestren que esta combinación tenga un efecto sinérgico en la acumulación de cadmio en los granos de cacao. Dependiendo de la cepa, la dosis y el momento de aplicación, *Trichoderma* puede estimular, no tener efecto o incluso inhibir la colonización micorrízica. Por lo tanto, es crucial que todos los tratamientos y sus combinaciones incluyan ambos microorganismos y consideren las interacciones entre ellos. La tabla 3 muestra las diferencias entre los HMA, *Trichoderma* spp. y su uso combinado, considerando los mecanismos de acción, la evidencia disponible y los aspectos que todavía necesitan investigarse.

Integración con el manejo del suelo y del material vegetal

En los sistemas de cultivo de cacao en Ecuador, es fundamental que la microbiología no reemplace el diagnóstico del sitio. Una recomendación técnica adecuada debe comenzar con un muestreo del suelo y de las almendras, así como con la determinación de elementos como el cadmio total y disponible, el pH, la materia orgánica, la textura, la capacidad de intercambio catiónico, y los niveles de fósforo, zinc, hierro, manganeso y calcio. Según los resultados obtenidos, se pueden realizar correcciones de acidez, ajustar la fertilización, seleccionar el material vegetal adecuado, añadir enmiendas orgánicas o inocular microorganismos. Es crucial verificar la efectividad de estas acciones en las almendras que han sido fermentadas y secadas, ya que una disminución en el suelo, las raíces o las hojas no garantiza que se cumplan los límites comerciales establecidos (Vanderschueren et al., 2021; García et al., 2025).

Tabla 2. Matriz de evidencia sobre HMA y *Trichoderma* spp. frente al Cd en cacao y sistemas comparativos.

Referencia	País/diseño	Hongo/tratamiento	Variable de Cd	Duración	Resultado principal	Nivel de evidencia/limitación
Pérez-Moncada et al. (2019)	Colombia; vivero, cacao joven	HMA nativos; consorcios × Cd	Raíz, tallo y hoja	4 meses	Redució la acumulación de Cd; respuesta dependiente del consorcio	Moderada. No evaluó almendras; efecto condicionado por el inóculo
Vallejos-Torres et al. (2022)	Perú; macetas / vivero	HMA + compost	Tallo y suelo	90 días	Disminuyó la absorción de Cd y mejoró el crecimiento	Moderada. El co-tratamiento impide aislar el efecto de HMA
Luis-Alaya et al. (2023)	Perú; plantaciones observacional	Colonización natural HMA / GRSP	Suelo y planta	Campo	Micorrización y GRSP se asociaron con retención y fitoestabilización.	Baja. Asociación observacional; no demuestra causalidad
Vega-Jara et al. (2025)	Perú; campo, cacao CCN-51	HMA; tratamiento individual entre opciones de manejo	Almendra y Cd disponible	6 meses	HMA redujo 40,43 % el Cd en almendras (0,94 a 0,56 mg kg ⁻¹)	Alta. Un sitio y seguimiento corto; el Cd final aún superó límites comerciales
Lafont-Quiñonez et al. (2025)	Colombia; vivero / controlado	HMA × Cd	R e s p u e s t a fisiológica y crecimiento	120 días	Mejóro biomasa y variables fisiológicas bajo estrés por Cd	Moderada para tolerancia. No demuestra menor Cd en almendra
Vallejos-Torres et al. (2026)	Perú; condiciones controladas	HMA × Cd en T. cacao y T. grandiflorum	T. Tallo y suelo	NR	En cacao, HMA redujo Cd en tallo y suelo y mejoró el crecimiento	Moderada. No evaluó almendra ni estabilidad multianual
Cueva-Paredes et al. (2026)	Perú; dos agroecosistemas, CCN-51	Consortio HMA / R. variable	Hoja y raíz	NR	Mejóro el crecimiento; la reducción de Cd no fue significativa	Moderada, resultado no concluyente. Evita generalizar un efecto positivo
Cayotopa-Torres et al. (2021)	Perú; laboratorio	10 cepas nativas de Trichoderma	Remoción de Cd en medio	In vitro	Cepas seleccionadas mostraron alta tolerancia y remoción de Cd	Preliminar. No demuestra reducción de Cd en plantas ni almendras
Malca-Cerna et al. (2025)	C o n d i c i o n e s controladas; cacao CCN-51	longibrachiatum y Trichoderma sp. destacaron	Cd en tallo	NR	Dos cepas redujeron Cd; otras aumentaron su absorción	Moderada. Efecto fuertemente dependiente de la cepa; sin campo ni almendra
Landero-Valenzuela et al. (2024)	México; frijol en suelo irrigado con aguas residuales	Tratamientos con Trichoderma spp.	Hoja, vaina y grano	Un ciclo	Algunos tratamientos redujeron Cd en tejidos y grano	Indirecta. Otro cultivo y contaminación multimetálica

Nota. Alta: evidencia directa de campo con Cd en almendra; Moderada: intervención directa en plantas de cacao; Baja: evidencia observacional; Preliminar: evidencia in vitro; Indirecta: evidencia procedente de otro cultivo o sistema. NR: no reportado en la síntesis disponible.

Tabla 3. Comparación del nivel de evidencia para HMA y *Trichoderma* spp.

Criterio	HMA	<i>Trichoderma</i> spp.	Coinoculación
Mecanismos	Retención en hifas y raíces, modificación de la rizósfera, nutrición y regulación del transporte	Biosorción, bioacumulación, homeostasis celular y promoción del crecimiento; respuesta dependiente de la cepa	Complementariedad teórica; interacción biológica no demostrada para Cd en cacao
Evidencia en cacao	Vivero, condiciones controladas, observación de campo y un ensayo de campo con Cd en almendra	Ensayos <i>in vitro</i> y un estudio controlado en plantas de cacao; sin validación de campo ni almendra	No hay evidencia directa de reducción de Cd en cacao mediante coinoculación
Nivel global de evidencia	Moderada–alta según el desenlace; más sólida para tejidos vegetativos que almendra	Preliminar–moderada; claramente dependiente de la cepa	Hipótesis por confirmar
Variable crítica / riesgo	Colonización, suelo, genotipo y tiempo; confundir menor concentración con eliminación del metal	Extrapolar remoción <i>in vitro</i> al campo o generalizar entre cepas	Afirmar sinergia sin tratamientos independientes y sin seguimiento de ambos hongos
Prioridad de investigación	Validación multisitio y multicosecha, persistencia y Cd en almendras	Ensayos con cepas nativas en vivero y campo, persistencia y almendras	Diseños factoriales HMA × <i>Trichoderma</i> y Cd en seguimiento de colonización, persistencia y Cd en grano



La combinación de HMA o *Trichoderma* spp. con una nutrición equilibrada, materia orgánica estable y un manejo adecuado de la rizósfera es una estrategia de investigación interesante, aunque su efectividad en conjunto aún no está completamente comprobada. Si la biomasa aumenta, el efecto de dilución podría disminuir la concentración sin que eso signifique que se reduzca la cantidad total de Cd que se absorbe. Por eso, es fundamental evaluar aspectos como la concentración, la biomasa, el contenido total por órgano, los factores de transferencia, la colonización o persistencia, así como el rendimiento y la calidad después de la cosecha. Hay más evidencia disponible para HMA, mientras que *Trichoderma* spp. aún necesita ser validado en condiciones de planta, campo y almendras.

Desafíos actuales y futuros

El siguiente paso es llevar los resultados de macetas, vivero y medios a plantaciones en campo. Para lograrlo, es fundamental evaluar el suelo en diferentes niveles de pH, su contenido de materia orgánica y su capacidad de intercambio. Esto se hará con genotipos que tienen tanto baja como alta acumulación, incluyendo las cepas nativas que ya hemos identificado. También es crucial realizar un control de calidad del inoculante y llevar a cabo evaluaciones a lo largo de varios ciclos de cosecha. Además, necesitamos más información sobre cómo el cadmio (Cd) presente en las almendras fermentadas y secas influye en la colonización y el mantenimiento de los microorganismos, el Cd disponible, el crecimiento, el rendimiento y la calidad del grano. También es importante entender el destino del metal retenido, el efecto de la coinoculación en experimentos de tipo factorial, así como la economía y el protocolo de transferencia a viveros y al campo.

Conclusión

La mitigación del cadmio en el cacao debe ser vista como un problema sistémico, ya que su acumulación está influenciada por la interacción entre el suelo, la rizósfera, la nutrición, el genotipo, la edad del cultivo y el manejo. Por lo tanto, las alternativas microbianas deben ser evaluadas dentro de un enfoque de manejo integrado que contemple el diagnóstico del sitio, la fertilidad, la selección de material vegetal y la trazabilidad del grano.

Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son el grupo con mayor respaldo experimental en el cacao. Con ciertas combinaciones de inóculo, suelo y genotipo, pueden ayudar a disminuir la concentración o translocación de cadmio y, en un ensayo de campo, reducir su concentración en las almendras. Sin embargo, estos efectos no son universales y es importante diferenciarlos de la retención temporal en raíces o estructuras fúngicas, así como de la dilución por crecimiento. Para validar

estos resultados, se requiere de consorcios bien caracterizados, comprobación de colonización y un seguimiento en múltiples sitios y cosechas.

Trichoderma spp. muestra tolerancia, biosorción y bioacumulación de cadmio, y ya hay evidencia controlada en plantas de cacao que demuestra respuestas que dependen de la cepa. Sin embargo, aún no hay suficiente respaldo para recomendar su uso comercial con el fin de reducir el cadmio en las almendras. La coinoculación de HMA y *Trichoderma* spp. debe seguir siendo una hipótesis de investigación. En Ecuador, la investigación futura debería enfocarse en ensayos en múltiples sitios, cepas nativas, genotipos contrastantes, análisis económicos, calidad del grano y verificación de cadmio en almendras fermentadas y secas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés en la presente publicación en ninguna de sus fases.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial como apoyo para la orientación metodológica y para mejorar la gramática y ortografía del manuscrito. Sin embargo, la búsqueda, selección, evaluación crítica, síntesis e interpretación de la literatura, así como la redacción científica final, fueron llevadas a cabo completamente por los autores. Después de utilizar estas herramientas, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido y asumen la plena responsabilidad de la publicación.

Referencias bibliográficas

- Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C. and 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>
- Argüello, D., Chavez, E., Gutierrez, E., Pittomvils, M., Dekeyrel, J., Blommaert, H. and Smolders, E. (2023). Soil amendments to reduce cadmium in cacao (*Theobroma cacao* L.): A comprehensive field study in Ecuador. *Chemosphere*, 324, 138318. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138318>
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E. and Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>

- Barraza, F., Moore, R. E. T., Rehkämper, M., Schreck, E., Lefeuvre, G., Kreissig, K., Coles, B. J. and Maurice, L. (2019). Cadmium isotope fractionation in the soil–cacao systems of Ecuador: A pilot field study. *RSC Advances*, 9, 34011–34022. <https://doi.org/10.1039/C9RA05516A>
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A. y Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N. and 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>
- Bravo, D., Leon-Moreno, C., Martínez, C. A., Varón-Ramírez, V. M., Araujo-Carrillo, G. A., Vargas, R., Quiroga-Mateus, R., Zamora, A. and Rodríguez, E. A. G. (2021). The first national survey of cadmium in cacao farm soil in Colombia. *Agronomy*, 11(4), 761. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040761>
- Bravo, D., Quiroga-Mateus, R., López-Casallas, M., Torres, S., Contreras, R., Otero, A. C. M., Araujo-Carrillo, G. A. and González-Orozco, C. E. (2024). Assessing the cadmium content of cacao crops in Arauca, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 387. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12539-9>
- Carrillo, K., Martínez, M., Ramírez, L., Argüello, D. and Chavez, E. (2023). Cadmium (Cd) distribution and soil–plant relationship in cacao farms in Costa Rica. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1209. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11817-2>
- Cayotopa-Torres, J., Arévalo-López, L., Pichis-García, R., Olivera-Cayotopa, D., Rimachi-Valle, M. y Márquez-Dávila, K. (2021). Nuevos agentes de biorremediación de cadmio: Especies de *Trichoderma* nativas de la rizósfera de árboles de cacao. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 155–160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>
- Chavez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B. and Baligar, V. C. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- Clemens, S. and Ma, J. F. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 489–512. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112301>
- Codex Alimentarius Commission. (2022). *Code of practice for the prevention and reduction of cadmium contamination in cocoa beans (CXC 81-2022)*. FAO/WHO. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/codes-of-practice/>
- Cueva-Paredes, D. L., Corazon-Guivin, M. A. y Pezo-Torres, M. N. (2026). Interacción micorrizica 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>
- Del Aguila-Torres, C. E., Pezo-Torres, M. N., Vega-Herrera, S. S., Verde-Girbau, C., Meseth, E., Corazon-Guivin, M. A. and Paz-Urrelo, J. L. (2026). Arbuscular mycorrhizal fungal community shifts driven by heavy metals in cocoa agroecosystems at different crop age. *Mycobiology*, 54(3), 424–439. <https://doi.org/10.1080/12298093.2026.2688575>
- De Almeida, N. M., de Almeida, A. A. F., de Almeida Santos, N., Mora-Ocampo, I. Y. and Pirovani, C. P. (2023). Leaf proteomic profiles in cacao scion–rootstock combinations tolerant and intolerant to cadmium toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 203, 107987. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107987>
- De Almeida, N. M., de Almeida, A. A. F., Santos, N. A., do Nascimento, J. L., de Carvalho Neto, C. H., Pirovani, C. P., Ahnert, D. and Baligar, V. C. (2022). Scion–rootstock interaction and tolerance to cadmium toxicity in juvenile *Theobroma cacao* plants. *Scientia Horticulturae*, 300, 111086. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111086>
- Dos Santos, M. L. S., de Almeida, A. A. F., da Silva, N. M., Oliveira, B. R. M., Silva, J. V. S., Junior, J. O. S., Ahnert, D. and Baligar, V. C. (2020). Mitigation of cadmium toxicity by zinc in juvenile cacao: Physiological, biochemical, molecular and micromorphological responses. *Environmental and Experimental Botany*, 179, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104201>
- Espinoza-Echeverría, E. E., Canchingre-Bone, M. E., Andrade-Benalcázar, D. L. and Serrano-Guerrero, S. F. (2023). Presence of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao* L.) soils in the province of Esmeraldas, Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 4(2), e23024. <https://doi.org/10.51798/sijis.v4i2.682>
- European Food Safety Authority. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal*, 10(1), 2551. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2551>
- European Commission. (2023). *Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No*



- 1881/2006. Official Journal of the European Union, L 119, 103-157. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj>
- Fernández-Paz, J., Cortés, A. J., Hernández-Varela, C. A., Mejía-de-Tafur, M. S., Rodríguez-Medina, C. and Baligar, V. C. (2021). Rootstock-mediated genetic variance in cadmium uptake by juvenile cacao (*Theobroma cacao* L.) genotypes, and its effect on growth and physiology. *Frontiers in Plant Science*, 12, 777842. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.777842>
- Ferrol, N., Tamayo, E. and 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>
- García Porras, G. A., Santos, J. A. dos, Carvalho, M. R. de, Pinzón-Sandoval, E. H., Pereira, A. A. S. and Guilherme, L. R. G. (2025). Addressing cadmium in cacao farmland: A path to safer, sustainable chocolate. *Agriculture*, 15(4), 433. <https://doi.org/10.3390/agriculture15040433>
- Gil, J. P., López-Zuleta, S., Quiroga-Mateus, R. Y., Benavides-Erazo, J., Chaali, N. and Bravo, D. (2022). Cadmium distribution in soils, soil litter and cacao beans: A case study from Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 2455-2476. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03299-x>
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M. and Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of the Total Environment*, 580, 677-686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.014>
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V. and 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>
- Guarín, D., Martín-López, J. M., Libohova, Z., Benavides-Bolaños, J., Maximova, S. N., Gultinan, M. J., Spargo, J., da Silva, M., Fernandez, A. and Drohan, P. (2024). Accumulation of cadmium in soils, litter and leaves in cacao farms in the North Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Geoderma Regional*, 36, e00762. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2024.e00762>
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M. and Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Hermosa, R., Viterbo, A., Chet, I. and Monte, E. (2012). Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. *Microbiology*, 158(1), 17-25. <https://doi.org/10.1099/mic.0.052274-0>
- Joya-Barrero, V., Huguet, C. and Pearse, J. (2023). Natural and anthropogenic sources of cadmium in cacao crop soils of Santander, Colombia. *Soil Systems*, 7(1), 12. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010012>
- Kubier, A., Wilkin, R. T. and Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108, 104388. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>
- Lafont-Quiñonez, O., Barrera-Violeth, J. L., Jiménez-Ramírez, A. M. and Royet-Barroso, J. J. (2025). Physiological evaluation of cacao plants (*Theobroma cacao* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi in soils contaminated by cadmium. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 19(2), 1-11. <https://doi.org/10.19053/uptc.24223719.18575>
- Landero-Valenzuela, N., Hernández-Nataren, E., Chávez-Cerón, L., Granados-Echegoyen, C. A., Alonso-Hernández, N., Mayek-Pérez, N., Lara-Viveros, F. M., Ponce-Lira, B. and Calderón-Cortés, N. (2024). Influence of *Trichoderma* species on the reduction of heavy metal levels in bean plants irrigated with wastewater: A case study from the Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 39, e28. <https://doi.org/10.1017/S1742170524000231>
- Letort, F., Chavez, E., Blommaert, H., Campillo, S., Sentenac, S., Tisserand, D., Martin, R., Denti, S. and Sarret, G. (2025). Calcium oxalate crystals in cacao trees and their interactions with cadmium. *Plant Physiology and Biochemistry*, 220, 109499. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.109499>
- López, J. E., Builes, S., Gil, A., Restrepo, T. I., Aristizábal, A. and Arroyave, C. (2023). Effects of different liming materials on the uptake of cadmium and mineral nutrients in cacao plants. *ACS Agricultural Science & Technology*, 3, 1139-1147. <https://doi.org/10.1021/acsagritech.3c00296>
- Luis-Alaya, B., Toro, M., Calsina, R., Ogata-Gutiérrez, K., Gil-Polo, A., Ormeño-Orrillo, E. and Zúñiga-Dávila, D. (2023). Evaluation of the presence of arbuscular

- mycorrhizae and cadmium content in the plants and soils of cocoa plantations in San Martín, Peru. *Diversity*, 15(2), 246. <https://doi.org/10.3390/d15020246>
- Malca-Cerna, R. Y., Apolinario, C.-L. A., Israel, C.-C. J., Marielita, A.-I. and Marjory, C.-V. L. (2025). Native strains *T. longibrachiatum* UCF17-M4 and *Trichoderma* sp. UCPF2 reduce Cd uptake in cacao CCN51 under controlled conditions. *Microbiology Research*, 16(6), 130. <https://doi.org/10.3390/microbiolres16060130>
- Mohsenzadeh, F. and Shahrokhi, F. (2014). Biological removing of cadmium from contaminated media by fungal biomass of *Trichoderma* species. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 102. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-102>
- Moore, R. E. T., Ullah, I., Dunwell, J. M. and Rehkämper, M. (2024). Stable isotope analyses reveal impact of Fe and Zn on Cd uptake and translocation by *Theobroma cacao*. *Plants*, 13(4), 551. <https://doi.org/10.3390/plants13040551>
- Nongmaithem, N., Roy, A. and Bhattacharya, P. M. (2016). Screening of *Trichoderma* isolates for their potential of biosorption of nickel and cadmium. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(2), 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.008>
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G. and Leiva, S. (2020). Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- Oliveira, B. R. M., de Almeida, A. A. F., Pirovani, C. P., Barroso, J. P., Carlos, C. H., Santos, N. A., Ahnert, D., Baligar, V. C. and Mangabeira, P. A. O. (2020). Mitigation of Cd toxicity by Mn in young plants of cacao, evaluated by the proteomic profiles of leaves and roots. *Ecotoxicology*, 29, 340-358. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02178-4>
- Oliveira, B. R. M., de Almeida, A. A. F., Santos, N. D. A. and Pirovani, C. P. (2022). Tolerance strategies and factors that influence the cadmium uptake by cacao tree. *Scientia Horticulturae*, 293, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110733>
- Ortiz-Álvarez, A., Magnitskiy, S., Silva-Arero, E. A., Rodríguez-Medina, C., Argout, X. and Castaño-Marín, Á. M. (2023). Cadmium accumulation in cacao plants (*Theobroma cacao* L.) under drought stress. *Agronomy*, 13(10), 2490. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102490>
- Oshiquiri, L. H., dos Santos, K. R. A., Ferreira Junior, S. A., Steindorff, A. S., Barbosa Filho, J. R., Mota, T. M., Ulhoa, C. J. and Georg, R. C. (2020). *Trichoderma harzianum* transcriptome in response to cadmium exposure. *Fungal Genetics and Biology*, 134, 103281. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2019.103281>
- Pérez-Moncada, U. A., Ramírez-Gómez, M. M., Serralde-Ordóñez, D. P., Peñaranda-Rolón, A. M., Wilches-Ortiz, W. A., Ramírez, L. y Rengifo-Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares 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>
- Ramtahal, G., Umaharan, P., Hanuman, A., Davis, C. and Ali, L. (2019). The effectiveness of soil amendments, biochar and lime, in mitigating cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*, 693, 133563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.369>
- Ramtahal, G., Yen, I. C., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., Maharaj, K. and Harrynanan, L. (2016). Relationships between cadmium in tissues of cacao trees and soils in plantations of Trinidad and Tobago. *Food and Nutrition Sciences*, 7, 37-43. <https://doi.org/10.4236/fns.2016.71005>
- Sandoval-Pineda, J. F., Pérez, U. A., Rodríguez, A. y Torres-Rojas, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biológica Colombiana*, 25(3), 333-344. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>
- Shoresh, M., Harman, G. E. and Mastouri, F. (2010). Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents. *Annual Review of Phytopathology*, 48, 21-43. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114450>
- Smolders, E. and Mertens, J. (2013). Cadmium. En B. J. Alloway (Ed.), *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3.^a ed., pp. 283-311). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_10
- Thomas, E., Atkinson, R., Zavaleta, D., Rodríguez, C., Lastra, S., Yovera, F., Arango, K., Pezo, A., Aguilar, J., Tames, M., Ramos, A., Cruz, W., Cosme, R., Espinoza, E., Chavez, C. R. and Ladd, B. (2023). The distribution of cadmium in soil and cacao beans in Peru. *Science of the Total Environment*, 881, 163372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163372>
- Vallejos-Torres, G., Torres, S. C., Gaona-Jimenez, N., Saavedra, J., Tuesta, J. C., Tuesta, O. A., Becerra, A. G., Marín, C. and Alguacil, M. 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>



- Vallejos-Torres, G., Gaona-Jimenez, N., Alva Arevalo, A., Paredes, C., Lozano, A., Saavedra-Ramírez, J., Arévalo, L. A., Reátegui, K., Mendoza-Caballero, W. and Marín, C. (2023). Cadmium uptake and mycorrhization by cacao clones in agroforestry and monoculture systems of Peruvian Amazon. *Bioagro*, 35(3), 237-246. <https://doi.org/10.51372/bioagro353.7>
- Vallejos-Torres, G., García-Vallejos, N., Gaona-Jimenez, N., Saavedra-Ramírez, J., Tuesta-Hidalgo, J. C., Tuesta-Hidalgo, O. A., Valdez-Andía, M. J., Ordoñez-Ruiz, K. M. and Baselly-Villanueva, J. R. (2026). Influence of cadmium and arbuscular mycorrhizae on growth and chlorophyll content in *Theobroma cacao* and *Theobroma grandiflorum* plants. *Advances in Agriculture*, 2026, 6852295. <https://doi.org/10.1155/AIA/6852295>
- Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G. and Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment*, 781, 146779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>
- Vanderschueren, R., Wantiez, L., Blommaert, H., Flores, J., Chavez, E. and Smolders, E. (2023). Revealing the pathways of cadmium uptake and translocation in cacao trees (*Theobroma cacao* L.): A 108Cd pulse-chase experiment. *Science of the Total Environment*, 869, 161816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161816>
- Vega-Jara, L., Palacin Agüero, J., Farfán Tucto, S., Vangeli, S. and Márquez-Dávila, K. (2025). Mitigation of cadmium accumulation in cocoa beans using arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and *Callisia repens*. *Folia Amazonica*, 34(2), e34800. <https://doi.org/10.24841/fa.v34i2.800>
- World Health Organization. (2011). Safety evaluation of certain food additives and contaminants: Cadmium. *WHO Food Additives Series*, 64, 305-380. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241660648>
- Xin, J. (2024). Enhancing soil health to minimize cadmium accumulation in agro-products: The role of microorganisms, organic matter, and nutrients. *Environmental Pollution*, 348, 123890. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123890>
- Yaghoubian, Y., Siadat, S. A., Moradi Telavat, M. R., Pirdashti, H. and Yaghoubian, I. (2019). Bio-removal of cadmium from aqueous solutions by filamentous fungi: *Trichoderma spp.* and *Piriformospora indica*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 7863-7872. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04255-6>
- Zhu, Y. X., Zhuang, Y., Sun, X. H. and Du, S. T. (2023). Interactions between cadmium and nutrients and their implications for safe crop production in Cd-contaminated soils. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53, 2071-2091. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2210985>
- Zug, K. L. M., Huamani Yupanqui, H. A., Meyberg, F., Cierjacks, J. S. and Cierjacks, A. (2019). Cadmium accumulation in Peruvian cacao (*Theobroma cacao* L.) and opportunities for mitigation. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, 72. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4109-x>

Declaración de contribución a la autoría según CRediT

Angela Leonor Palacios Cedeño: conceptualización, investigación, curación de datos, metodología, análisis formal, visualización, redacción del borrador original del artículo, redacción, revisión y edición del artículo. **Edisson Wilfrido Cuenca-Cuenca:** conceptualización, metodología, análisis formal, supervisión, validación, visualización, redacción, revisión y edición del artículo.