

# Mitigación del Cadmio en cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*) mediante el uso de enmiendas orgánicas y químicas en suelos tropicales en invernadero

Edgar Patricio Cedeño-Coll<sup>1</sup>; Sady Javier García-Bendezú<sup>2</sup>;  
Manuel Danilo Carrillo-Zenteno<sup>3</sup>; Wuellins Dennis Durango-Cabanilla<sup>4</sup>;  
Luis Humberto Vásquez-Cortez<sup>5</sup>; Fernando Javier Cobos-Mora<sup>6</sup>

## Resumen

La acumulación de cadmio (Cd) en plantas de cacao representa una limitante crítica para la sostenibilidad productiva y la comercialización internacional del grano, lo que ha impulsado la búsqueda de estrategias agronómicas orientadas a reducir su biodisponibilidad en el suelo. Objetivo. Evaluar el efecto de enmiendas orgánicas y minerales sobre la acumulación y transferencia de Cd en plantas de cacao (*Theobroma cacao L.*) bajo condiciones controladas de invernadero. Materiales y métodos. El estudio se desarrolló durante 153 días en el invernadero de la Estación Experimental Tropical Pichilingue (INIAP, Ecuador), utilizando suelo proveniente de una plantación cacaotera del cantón Santa Rosa, provincia de El Oro. Se empleó un diseño completamente al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones, que incluyeron zeolita, lombricompost, carbonato de calcio, carbón activado, carbón vegetal, torta de filtro de caña de azúcar, microorganismos y un testigo absoluto. Se evaluaron variables de crecimiento, pH del suelo, concentración y contenido de Cd en tejidos, así como la tasa de transferencia del metal. Resultados. Las enmiendas no generaron efectos significativos sobre las variables morfológicas ni sobre el pH del suelo; sin embargo, se observaron diferencias significativas en la dinámica del Cd. Los tratamientos con materiales carbonosos, especialmente el carbón activado, mostraron una mayor eficiencia en la reducción del contenido de Cd en la parte aérea y en la disminución de su transferencia desde la raíz, en comparación con el tratamiento testigo. Conclusiones. El uso de enmiendas, particularmente materiales carbonosos, constituye una estrategia eficaz para reducir la acumulación y movilidad del Cd en plantas de cacao bajo condiciones de invernadero. Estos resultados evidencian su potencial como herramienta de manejo para mitigar la contaminación por Cd en sistemas cacaoteros; no obstante, se requiere su validación en condiciones de campo y durante ciclos productivos completos.

**Palabras clave:** bioinmovilización de metales, carbón activado, contaminación del suelo, enmiendas edáficas, metales pesados.

## Cadmium Mitigation in Cocoa (*Theobroma cacao L.*) Using Organic and Chemical Amendments in Tropical Soils under Greenhouse Conditions

### Abstract

Cadmium (Cd) accumulation in cocoa plants represents a critical constraint for production sustainability and international market access, driving the need for agronomic strategies aimed at reducing its bioavailability in soils. Objective. To evaluate the effect of organic and mineral amendments on Cd accumulation and translocation in cocoa plants (*Theobroma cacao L.*) under controlled greenhouse conditions. Materials and methods. The study was conducted over a 153-day period in the greenhouse of the Tropical Experimental Station Pichilingue (INIAP, Ecuador), using soil collected from a cocoa plantation in Santa Rosa canton, El Oro Province. A completely randomized design with eight treatments and four replicates was applied, including zeolite, vermicompost, calcium carbonate, activated carbon, charcoal, sugarcane filter cake, microorganisms, and an untreated control. Plant growth variables, soil pH, Cd concentration and content in plant tissues, as well as Cd transfer from roots to shoots, were evaluated. Results. The amendments did not significantly affect plant growth variables or soil pH; however, significant differences were observed in Cd dynamics. Treatments involving carbon-based materials, particularly activated carbon, showed greater effectiveness in reducing Cd content in the aerial parts and limiting its transfer from roots, compared to the control treatment. Conclusions. The application of soil amendments, especially carbon-based materials, represents an effective strategy to reduce Cd accumulation and mobility in cocoa plants under greenhouse conditions. These findings highlight their potential as a management tool to mitigate Cd contamination in cocoa production systems; however, further validation under field conditions and across full production cycles is required.

**Keywords:** metal bioimmobilization, activated carbon, soil contamination, soil amendments, heavy metals.

**Recibido:** 25 de diciembre 2025

**Aceptado:** 07 de abril 2026

<sup>1</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú; pcedeno16@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7607-4191>

<sup>2</sup> Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú; sjgarciab@lamolina.edu.pe; <https://orcid.org/0000-0002-2498-3940>

<sup>3</sup> Departamento de Manejo de Suelos y Aguas, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Quevedo, Ecuador; manuel.carrillo@iniap.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0001-7062-8248>

<sup>4</sup> Departamento de Manejo de Suelos y Aguas, Estación Experimental Tropical Pichilingue, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), Quevedo, Ecuador; wuellins.durango@iniap.gob.ec; <https://orcid.org/0000-0002-4683-5316>

<sup>5</sup> Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Agroindustria, Babahoyo, Los Ríos, Ecuador; Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo, ICAI-Conicet, San Rafael 5600, Mendoza, Argentina; lvazquezc@utb.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-1850-0217>

<sup>6</sup> Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Agroindustria, Babahoyo, Los Ríos, Ecuador; fcobos@utb.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

## I. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao L.*), especie arbórea perenne de la familia *Malvaceae* ampliamente cultivada en regiones tropicales, constituye un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y la economía en múltiples países, especialmente en América Latina donde Ecuador destaca como uno de los principales productores tradicionales (Vera et al., 2024). La importancia socioeconómica del cacao se refleja en la dependencia de millones de pequeños productores cuya subsistencia y acceso a mercados internacionales dependen de la calidad y seguridad del producto (Vera et al., 2023). Sin embargo, la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd) en suelos y granos de cacao ha emergido como un problema crítico, especialmente por las estrictas regulaciones impuestas por mercados como la Unión Europea respecto a límites máximos de Cd en productos de cacao (Vásquez et al., 2024).

El cadmio es un metal pesado no esencial para los organismos vivos y asociado con efectos tóxicos en humanos y ecosistemas; su acumulación en alimentos representa un riesgo para la salud, dado que puede bioacumularse en tejidos y persistir en la cadena alimentaria (Vásquez et al., 2022). El cacao y sus productos derivados, debido a prácticas agrícolas y características edáficas de algunos suelos tropicales, pueden presentar elevadas concentraciones de Cd que superan límites permisibles establecidos por regulaciones internacionales, lo que pone en riesgo la comercialización en mercados exigentes (Salazar et al., 2025).

En Ecuador y otras regiones de América Latina, estudios nacionales a gran escala han evidenciado que la acumulación de Cd en granos de cacao está fuertemente relacionada con las características del suelo y factores agronómicos. Una encuesta a nivel país demostró que aproximadamente el 45 % de las muestras de granos de cacao excedían el umbral de  $0,60 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd, subrayando zonas hotspot donde los niveles son particularmente altos y ponen en cuestión la aptitud comercial del producto en contextos regulados por estándares estrictos de Cd en alimentos (Intriago et al., 2023).

Además, investigaciones realizadas en suelos y tejidos vegetales de sistemas cacaoteros han

corroborado que existe correlación significativa entre las concentraciones de Cd en suelos agrícolas y las acumulaciones en granos de cacao, lo que indica la necesidad de estrategias de gestión de suelo orientadas a disminuir la disponibilidad de Cd para la planta (Chavez et al., 2015).

Frente a esta problemática, la aplicación de enmiendas orgánicas y minerales ha sido propuesta como una alternativa potencial para reducir la movilidad y absorción de Cd por las plantas, mediante mecanismos de inmovilización, adsorción o modificación de propiedades fisicoquímicas del suelo. No obstante, la eficacia comparativa de dichas enmiendas en condiciones controladas, particularmente en suelos tropicales contaminados, requiere evaluación experimental sistemática.

El objetivo de la presente investigación fue determinar el efecto de aplicaciones de enmiendas orgánicas y minerales sobre la acumulación de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao L.*) cultivadas en invernadero, en un suelo de una plantación cacaotera de la Asociación Río Negro, parroquia La Victoria, cantón Santa Rosa, Ecuador.

## II. METODOLOGÍA

### Área de estudio y origen del suelo (Etapas 1).

La investigación se desarrolló en dos etapas. La primera correspondió a la recolección del suelo en una plantación cacaotera perteneciente a la Asociación Río Negro, ubicada en la parroquia La Victoria, cantón Santa Rosa, provincia de El Oro, Ecuador ( $3^{\circ}23'52.56'' \text{ S}$ ;  $79^{\circ}50'42.37'' \text{ O}$ ), a una altitud aproximada de 8 m s. n. m. La zona presenta un clima tropical húmedo, con temperatura media anual de  $27^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $34^{\circ}\text{C}$  y mínima de  $21^{\circ}\text{C}$ , precipitación anual de 1246,4 mm y humedad relativa promedio de 86,1 %. En esta provincia, el cacao constituye el segundo cultivo perenne de mayor importancia económica después del banano, con una superficie estimada de 19 457 ha, de las cuales aproximadamente 10 648 ha corresponden al clon CCN-51 (*Theobroma cacao L.*, familia *Malvaceae*) (Vásquez et al., 2025).

El suelo fue recolectado de manera compuesta en diferentes puntos del lote, a una profundidad de 0–10 cm, utilizando herramientas manuales

previamente desinfectadas. Se obtuvieron aproximadamente 100 kg de suelo, los cuales fueron transportados en recipientes limpios al Laboratorio de Metales Pesados del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Tropical Pichilingue del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) para su acondicionamiento y análisis previo.

Previo al establecimiento del experimento, el suelo fue caracterizado para determinar sus propiedades fisicoquímicas iniciales. Se evaluó el pH ( $5,21 \pm 0,08$ ), el contenido de materia orgánica (2,34 %), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ( $12,8 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ ) y la textura (franco-arcillosa).

La concentración total de cadmio (Cd) se determinó mediante digestión ácida del suelo utilizando una mezcla de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido clorhídrico (HCl) en proporción 3:1 (agua regia), seguida de cuantificación mediante espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (GFAAS).

La fracción biodisponible de Cd se estimó mediante extracción con solución de  $\text{CaCl}_2$  0,01 M, utilizando una relación suelo:solución de 1:10 (p/v), con agitación constante durante 2 h a temperatura ambiente. Posteriormente, las muestras fueron filtradas y el Cd en el extracto fue determinado mediante GFAAS.

Esta caracterización permitió establecer la línea base del sistema edáfico y evaluar la respuesta de las enmiendas sobre la movilidad y absorción del metal.

### **Ubicación y condiciones del ensayo en invernadero (Etapa 2)**

La segunda etapa del estudio se llevó a cabo en el invernadero de la Estación Experimental Tropical Pichilingue (EETP) del INIAP, ubicada en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador ( $1^{\circ}06' \text{ S}$ ;  $79^{\circ}27' \text{ O}$ ), a una altitud de 75 m s. n. m. El sitio presenta una temperatura promedio anual de  $25,2^{\circ} \text{ C}$ , precipitación media anual de 1551 mm, humedad relativa de 84,3 % y una heliofanía aproximada de 768 h año<sup>-1</sup>.

### **Material vegetal**

Se utilizaron semillas del clon CCN-51 de

cacao (*Theobroma cacao L.*), clon ampliamente cultivado en Ecuador por su alta productividad y adaptación a condiciones tropicales. Las semillas fueron seleccionadas por uniformidad y viabilidad antes de la siembra.

### **Preparación del sustrato y establecimiento del experimento**

El suelo fue secado a temperatura ambiente, molido y tamizado (malla de 2 mm) para garantizar su homogeneidad.

Para minimizar la variabilidad experimental, el suelo fue completamente homogenizado antes de la preparación del sustrato. Se utilizó una mezcla uniforme de 700 g de suelo y 300 g de tamo de arroz por unidad experimental, asegurando condiciones consistentes de aireación, drenaje y retención de humedad en todas las unidades experimentales.

Las enmiendas se incorporaron de manera uniforme y el sustrato fue incubado durante 15 días a capacidad de campo, permitiendo la estabilización de las interacciones fisicoquímicas. Este procedimiento garantizó condiciones iniciales comparables entre tratamientos.

Posteriormente, el sustrato fue colocado en recipientes plásticos de 1 kg, donde se sembraron las semillas. El periodo experimental fue de 153 días.

### **Fertilización**

Durante el ensayo se realizaron tres aplicaciones de fertilización mineral. La primera se efectuó a los 61 días después de la siembra, utilizando fosfato diamónico (18 % N – 46 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) a una dosis de 1,31 g por maceta, diluido en 10 mL de agua por unidad experimental.

La segunda fertilización se realizó ocho días después de la primera aplicación, utilizando urea (46 % N) a una dosis de 1,75 g y muriato de potasio (60 %  $\text{K}_2\text{O}$ ) a una dosis de 0,66 g por maceta, aplicados directamente al sustrato.

La tercera fertilización se efectuó a los 16 días posteriores a la primera aplicación, utilizando las mismas fuentes y dosis que en la segunda fertilización.

Las aplicaciones se realizaron con el objetivo de asegurar un adecuado suministro de nutrientes esenciales durante el desarrollo del cultivo,

evitando deficiencias que pudieran interferir en la absorción y acumulación de cadmio en las plantas.

**Tratamientos y diseño experimental**

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar, con ocho tratamientos y cuatro repeticiones por tratamiento, siendo cada maceta una unidad experimental.

El número de repeticiones (n = 4) se definió considerando las condiciones controladas de invernadero, donde la variabilidad ambiental es reducida, lo que permite una estimación adecuada del error experimental y un poder estadístico suficiente para detectar diferencias significativas entre tratamientos mediante análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de  $p \leq 0,05$ .

Los tratamientos consistieron en siete enmiendas orgánicas y minerales aplicadas a una dosis equivalente de  $2 \text{ t ha}^{-1}$ , una enmienda líquida aplicada a  $600 \text{ L ha}^{-1}$  y un testigo absoluto sin enmienda (Cuadro 1).

Las dosis de enmiendas fueron seleccionadas con base en criterios agronómicos y evidencia experimental en suelos tropicales, donde aplicaciones cercanas a  $2 \text{ t ha}^{-1}$  han demostrado ser efectivas para modificar propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como la capacidad de adsorción y retención de metales pesados, favoreciendo la inmovilización del cadmio sin generar efectos negativos sobre el crecimiento vegetal (Zhou et al., 2024).

**Cuadro 1.** Tratamientos a ensayar en el experimento de uso de enmiendas orgánicas y químicas.  
**Table 1.** Treatments evaluated in the experiment using organic and chemical amendments

Tratamientos	Enmiendas	Dosis $\text{t ha}^{-1}$
1	Testigo absoluto	0
2	Zeolita	2
3	Lombricompost	2
4	Carbonato de calcio	2
5	Carbón activado	2
6	Carbón vegetal	2
7	Torta de filtro de caña de azúcar	2
8	Microorganismos (Bacterias)	0,6

Las variables evaluadas fueron seleccionadas en función de su relación con los mecanismos de mitigación del cadmio, considerando procesos como la absorción radicular, la acumulación en tejidos y la translocación hacia la parte aérea, lo que permite inferir la eficiencia de las enmiendas en la reducción de la movilidad del metal en el sistema suelo-planta. Si bien se determinó la fracción biodisponible de Cd en la caracterización inicial del suelo, no se realizaron mediciones dinámicas de dicha fracción durante el desarrollo del experimento. Esta limitación impide evaluar directamente los cambios temporales en la biodisponibilidad del metal inducidos por las enmiendas; por lo tanto, la interpretación de los mecanismos de inmovilización se basa en la respuesta observada en los tejidos vegetales.

Las variables de crecimiento vegetal (altura de planta, diámetro de tallo y biomasa), pH del suelo, concentración y contenido de cadmio en tejidos,

así como la tasa de transferencia del metal, fueron sometidas a análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño completamente al azar, considerando los tratamientos como factor fijo.

Previo al análisis, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene.

Cuando el efecto de tratamiento resultó significativo ( $p \leq 0,05$ ), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey para la separación de medias.

Adicionalmente, se realizaron análisis de correlación de Pearson entre las variables evaluadas, con el fin de explorar relaciones entre la acumulación de cadmio y las variables de crecimiento. Asimismo, se aplicó un análisis de componentes principales (ACP) para evaluar patrones de variabilidad y agrupamiento entre tratamientos.

Los resultados se expresaron como media  $\pm$  error estándar, reportando valores exactos de  $p$  cuando fue pertinente. El procesamiento de los datos se realizó mediante software estadístico especializado.

### **Manejo agronómico**

El riego se realizó tres veces por semana, aplicando 100 mL de agua desionizada por unidad experimental, con el fin de mantener el sustrato cercano a capacidad de campo y asegurar condiciones hídricas homogéneas en todos los tratamientos. Este manejo permitió reducir la variabilidad asociada a la disponibilidad de agua, factor que puede influir en la movilidad y absorción de cadmio en el sistema suelo-planta.

El último riego se efectuó tres días antes de la cosecha, con el propósito de estabilizar el contenido de humedad del sustrato y evitar interferencias en la determinación de biomasa y concentración de Cd en los tejidos vegetales.

Se realizaron tres aplicaciones de fertilización mineral durante el periodo experimental. La primera se efectuó a los 61 días después de la siembra, utilizando una fuente nitrogenada-fosfatada. La segunda y tercera fertilización se realizaron a los 8 y 16 días posteriores, respectivamente, empleando fuentes nitrogenadas y potásicas en dosis ajustadas por unidad experimental.

El manejo nutricional se diseñó para garantizar un adecuado suministro de nutrientes esenciales, evitando condiciones de deficiencia que pudieran alterar la absorción, acumulación o translocación de cadmio en las plantas, asegurando así que las diferencias observadas se atribuyan principalmente al efecto de las enmiendas evaluadas.

### **Cosecha y preparación de muestras**

Al finalizar el periodo experimental (153 días), las plantas fueron cosechadas separando cuidadosamente la parte aérea y el sistema radicular, con el fin de evitar contaminación cruzada entre tejidos.

Los tejidos vegetales fueron sometidos a un proceso de lavado secuencial utilizando agua

potable, seguido de agua destilada y finalmente agua desionizada, con el objetivo de eliminar partículas de suelo y posibles contaminantes externos que pudieran interferir en la determinación de cadmio.

Posteriormente, se determinó el peso fresco de cada muestra. Las muestras fueron secadas en estufa de circulación de aire a 70 °C durante 72 h hasta alcanzar peso constante, asegurando la eliminación completa de la humedad.

El material seco fue molido hasta obtener un tamaño de partícula homogéneo, utilizando equipos previamente limpiados para evitar contaminación. Las muestras fueron almacenadas en recipientes herméticos debidamente identificados, bajo condiciones controladas, para su posterior análisis de cadmio en laboratorio.

Este procedimiento garantizó la integridad de las muestras y la confiabilidad de los resultados analíticos asociados a la cuantificación del metal.

## **III. RESULTADOS**

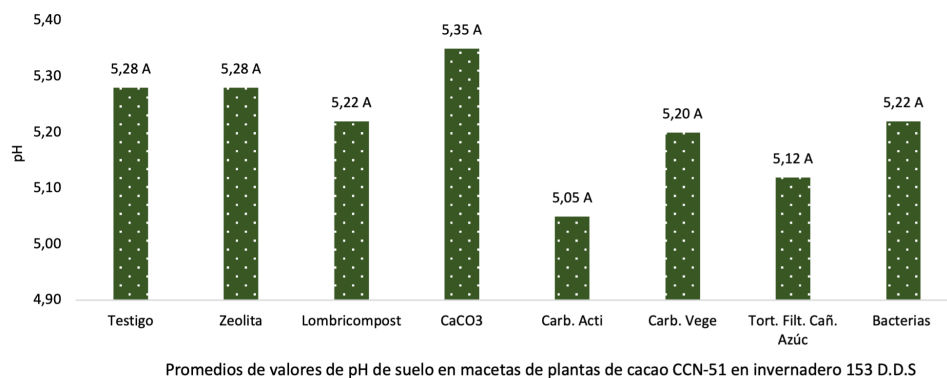
### **pH de suelo**

El análisis de varianza no evidenció diferencias significativas en el pH del suelo entre los tratamientos evaluados ( $F = 1,75$ ;  $p = 0,1520$ ), como se muestra en la Figura 1. Los valores de pH se mantuvieron en un rango estrecho entre 5,05 y 5,35, lo que indica una respuesta homogénea del sistema edáfico frente a la aplicación de las enmiendas. El tratamiento con carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presentó el valor promedio más alto ( $5,35 \pm 0,07$ ), mientras que el tratamiento con carbón activado registró el valor más bajo ( $5,05 \pm 0,07$ ). No obstante, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos los tratamientos compartieron el mismo grupo estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos. En este sentido, los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento, la aplicación de las enmiendas no generó cambios sustanciales en el pH del suelo; sin embargo, esta respuesta debe interpretarse dentro del contexto del ensayo en invernadero.

**Figura 1.** Promedios de pH de suelo de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, a los 153 D.D.S.

**Figure 1.** Mean soil pH of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 153 days after sowing (DAS).

**Altura de planta**



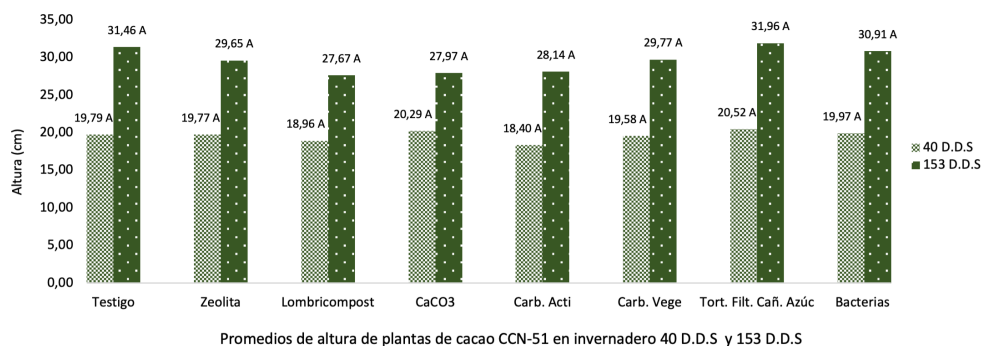
La altura de planta de cacao evaluada a los 153 días después de la siembra no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $F = 1,75$ ;  $p = 0,1522$ ), como se muestra en la Figura 2. Los valores promedio oscilaron entre  $27,67 \pm 1,25$  cm y  $31,96 \pm 1,25$  cm, lo que indica una respuesta homogénea del cultivo frente a la aplicación de las enmiendas. El tratamiento con torta de filtro de caña de azúcar registró el valor promedio más alto ( $31,96 \pm 1,25$  cm), mientras que el tratamiento con lombricompost presentó el valor más bajo ( $27,67 \pm 1,25$  cm). No obstante, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos los tratamientos compartieron el mismo grupo

estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos.

De manera similar, en la evaluación realizada a los 40 días después de la siembra no se evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos ( $F = 1,01$ ;  $p = 0,4513$ ), con valores promedio comprendidos entre  $18,40 \pm 0,69$  cm y  $20,52 \pm 0,69$  cm. Los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas no generó efectos estadísticamente significativos sobre la altura de planta; por lo tanto, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 2.** Promedios de altura de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, a los 40 D.D.S y 153 D.D.S.

**Figure 2.** Mean plant height of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 40 and 153 days after sowing (DAS).



### Diámetro de tallo

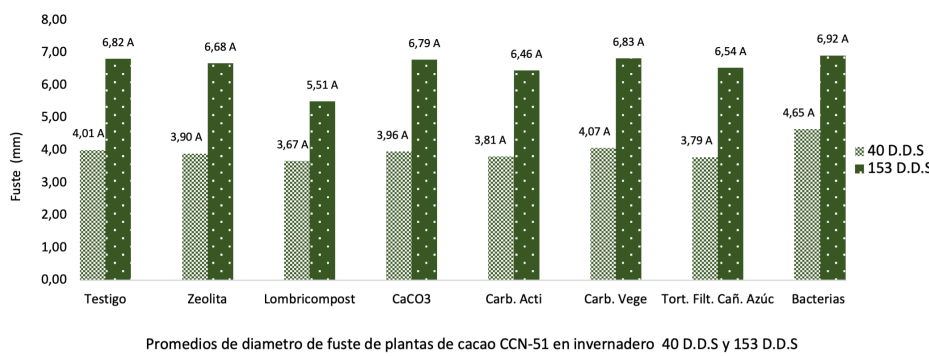
El diámetro de tallo de plantas de cacao evaluado a los 153 días después de la siembra no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $F = 1,16$ ;  $p = 0,3645$ ), como se muestra en la Figura 3. Los valores promedio oscilaron entre  $6,46 \pm 0,16$  mm y  $6,92 \pm 0,16$  mm, lo que indica una respuesta homogénea del cultivo frente a la aplicación de las enmiendas. El tratamiento con bacterias registró el valor promedio más alto ( $6,92 \pm 0,16$  mm), mientras que el tratamiento con torta de filtro de caña de azúcar presentó el valor más bajo ( $6,46 \pm 0,16$  mm). No obstante, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos los tratamientos compartieron el mismo

grupo estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos.

De manera similar, en la evaluación realizada a los 40 días después de la siembra no se evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos ( $F = 1,18$ ;  $p = 0,3531$ ), con valores promedio comprendidos entre  $3,67 \pm 0,28$  mm y  $4,65 \pm 0,28$  mm. En este contexto, los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas no generó efectos estadísticamente significativos sobre el diámetro de tallo; por lo tanto, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 3.** Promedios de diámetro de fuste de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, 40 D.D.S y 153 D.D.S.

**Figure 3.** Mean stem diameter of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 40 and 153 days after sowing (DAS).



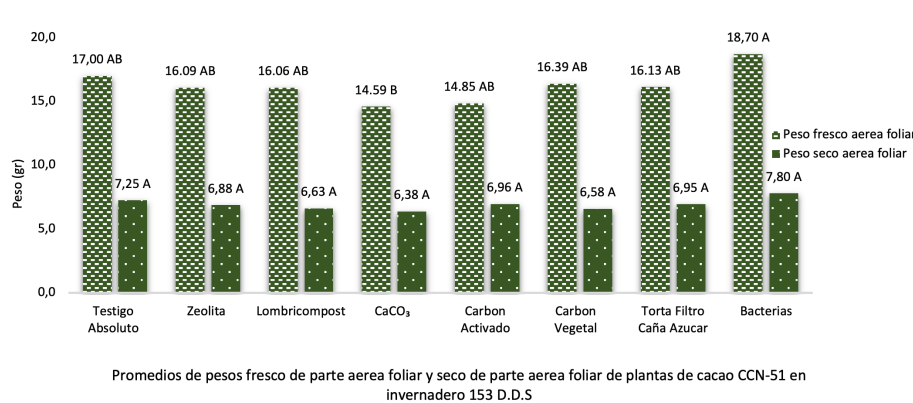
### Producción de materia fresca y seca aérea

La producción de materia fresca aérea de plantas de cacao evaluadas a los 153 días después de la siembra presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $F = 3,23$ ;  $p = 0,0174$ ), como se muestra en la Figura 4. Los valores promedio oscilaron entre  $15,81 \pm 0,60$  g y  $18,70 \pm 0,60$  g, evidenciando una respuesta diferencial del cultivo frente a la aplicación de las enmiendas. El tratamiento con bacterias registró el valor promedio más alto ( $18,70 \pm 0,60$  g), mientras que el tratamiento con carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presentó el valor más bajo ( $15,81 \pm 0,60$  g). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), se observó una diferenciación

parcial entre tratamientos, donde el tratamiento con bacterias se agrupó en la categoría estadística A, mientras que el tratamiento con  $\text{CaCO}_3$  se ubicó en el grupo B, indicando diferencias significativas entre estos extremos; los tratamientos intermedios compartieron grupos estadísticos A B, lo que evidencia una respuesta intermedia entre los tratamientos evaluados. En este contexto, los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas generó efectos diferenciados sobre la producción de biomasa fresca aérea; sin embargo, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 4.** Promedios de producción de materia fresca y seca aérea de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, a los 40 D.D.S y 153 D.D.S.

**Figure 4.** Mean aerial fresh and dry matter production of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 40 and 153 days after sowing (DAS).



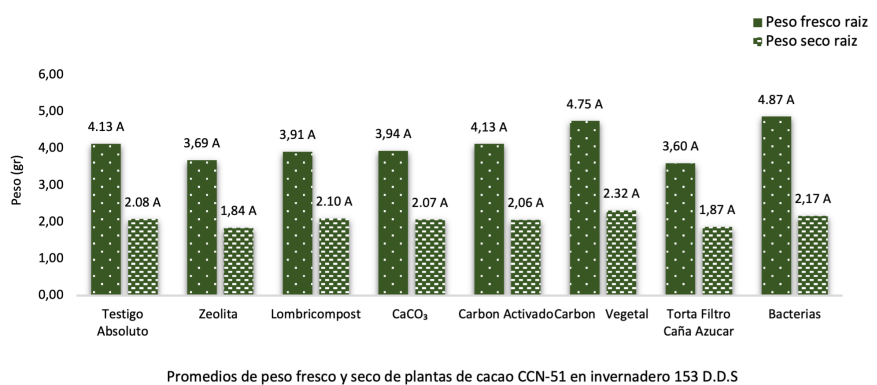
**Producción de materia fresca y seca radical**

La producción de materia fresca radical de plantas de cacao evaluadas a los 153 días después de la siembra no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $F = 2,02$ ;  $p = 0,1004$ ), como se muestra en la Figura 5. Los valores promedio oscilaron entre  $3,60 \pm 0,32$  g y  $4,87 \pm 0,32$  g, lo que indica una respuesta homogénea del sistema radical del cultivo frente a la aplicación de las enmiendas. El tratamiento con bacterias registró el valor promedio más alto ( $4,87 \pm 0,32$  g), mientras que el tratamiento con torta de filtro de caña de azúcar presentó el valor más bajo ( $3,60 \pm 0,32$  g). No obstante, de acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos

los tratamientos compartieron el mismo grupo estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos.

De manera similar, la producción de materia seca radical tampoco presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ( $F = 1,16$ ;  $p = 0,3680$ ), con valores promedio comprendidos entre  $1,84 \pm 0,14$  g y  $2,32 \pm 0,14$  g. En este contexto, los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas no generó efectos estadísticamente significativos sobre la producción de biomasa radical; por lo tanto, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 5.** Promedios de producción de materia fresca y seca de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, a los 40 D.D.S y 153 D.D.S  
**Figure 5.** Mean fresh and dry matter production of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 40 and 153 days after sowing (DAS).



### Análisis de Cd en la parte aérea y radical de plantas de cacao

#### Concentración de Cd en parte aérea y radical

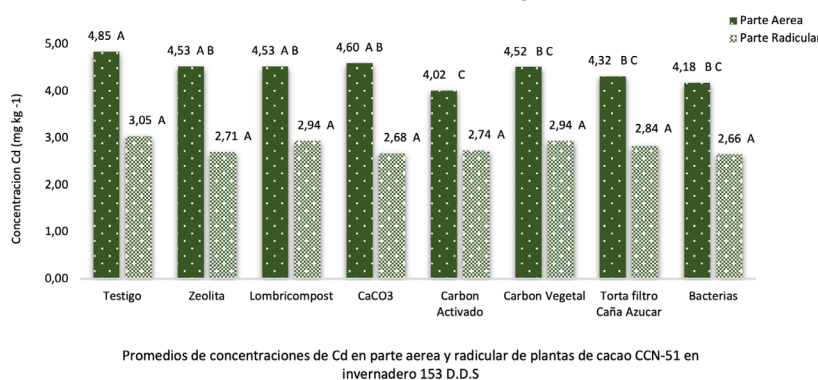
La concentración de cadmio (Cd) en la parte aérea de plantas de cacao evaluadas a los 153 días después de la siembra presentó diferencias altamente significativas entre los tratamientos ( $F = 8,26$ ;  $p < 0,0001$ ), como se muestra en la Figura 6. Los valores promedio oscilaron entre  $4,02 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $4,85 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que indica respuestas diferenciadas en la acumulación del metal en función de las enmiendas aplicadas. El tratamiento testigo absoluto registró la mayor concentración de Cd en la parte aérea ( $4,85 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento con carbón activado presentó el valor más bajo ( $4,02 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), se observó una clara diferenciación entre tratamientos, donde el testigo se agrupó en la categoría estadística A, mientras que el carbón activado se ubicó en el grupo C, indicando diferencias significativas entre estos extremos; los tratamientos intermedios se distribuyeron entre los grupos A B y B C, reflejando

respuestas graduales en la acumulación del metal.

En contraste, la concentración de Cd en la parte radical no presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ( $F = 2,47$ ;  $p = 0,0510$ ), como se muestra también en la Figura 6, con valores promedio comprendidos entre  $2,66 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $3,05 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ . El tratamiento testigo absoluto registró el mayor valor promedio ( $3,05 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento con bacterias presentó el valor más bajo ( $2,66 \pm 0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Sin embargo, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos los tratamientos compartieron el mismo grupo estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos.

Los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas generó efectos diferenciados en la acumulación de Cd en la parte aérea, mientras que en el sistema radical no se evidenciaron cambios estadísticamente significativos; por lo tanto, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 6.** Promedios de concentración de Cd de parte aérea y radicular de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, a los 153 D.D.S  
**Figure 6.** Mean cadmium concentration in the aerial and root parts of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 153 days after sowing (DAS).



#### Contenido de Cd en parte aérea y radical

El contenido de cadmio (Cd) en la parte aérea de plantas de cacao evaluadas a los 153 días después de la siembra presentó diferencias significativas entre los tratamientos ( $F = 3,20$ ;  $p = 0,0181$ ), como se muestra en la Figura 7. Los valores promedio oscilaron entre  $27,85 \pm 1,29 \mu\text{g kg}^{-1}$  y  $35,08 \pm 1,29 \mu\text{g kg}^{-1}$ , lo que indica respuestas diferenciadas en el

contenido del metal en función de las enmiendas aplicadas. El tratamiento testigo absoluto registró el mayor contenido de Cd ( $35,08 \pm 1,29 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento con carbón activado presentó el valor más bajo ( $27,85 \pm 1,29 \mu\text{g kg}^{-1}$ ). De acuerdo con la prueba de comparación múltiple de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), se observó una diferenciación parcial entre tratamientos, donde el testigo se

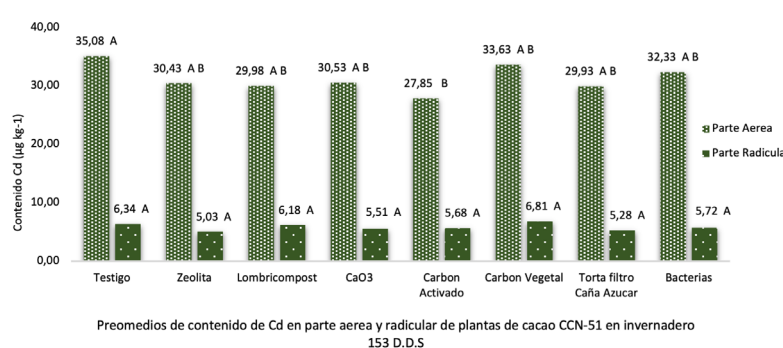
agrupó en la categoría estadística A, mientras que el tratamiento con carbón activado se ubicó en el grupo B, indicando diferencias significativas entre estos extremos; los tratamientos intermedios compartieron grupos A B, lo que refleja una respuesta intermedia en el contenido del metal.

En contraste, el contenido de Cd en la parte radical no presentó diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ( $F = 1,75$ ;  $p = 0,1513$ ), como se muestra también en la Figura 7, con valores promedio comprendidos entre  $5,03 \pm 0,44 \mu\text{g kg}^{-1}$  y  $6,81 \pm 0,44 \mu\text{g kg}^{-1}$ . El tratamiento con zeolita registró el valor más bajo ( $5,03 \pm 0,44 \mu\text{g kg}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento con carbón vegetal

presentó el valor más alto ( $6,81 \pm 0,44 \mu\text{g kg}^{-1}$ ). Sin embargo, de acuerdo con la prueba de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ), todos los tratamientos compartieron el mismo grupo estadístico (A), lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ellos.

En este contexto, los resultados indican que, bajo las condiciones controladas del experimento en invernadero, la aplicación de las enmiendas generó efectos diferenciados en el contenido de Cd en la parte aérea, mientras que en el sistema radical no se evidenciaron cambios estadísticamente significativos; por lo tanto, estos resultados deben interpretarse dentro del alcance del sistema experimental evaluado.

**Figura 7.** Promedios de contenido de Cd en parte aérea y radicular de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, en plantas de cacao 153 D.D.S  
**Figure 7.** Mean cadmium content in the root system of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 153 days after sowing (DAS).



### Tasa de transferencia de Cd

La tasa de transferencia de cadmio (Cd) desde la raíz hacia la parte aérea de plantas de cacao se presenta en la Figura 8. Los valores obtenidos evidencian diferencias en la movilización del metal entre tratamientos, con promedios que oscilaron entre  $1,47$  y  $1,72 \text{ mg kg}^{-1}$ .

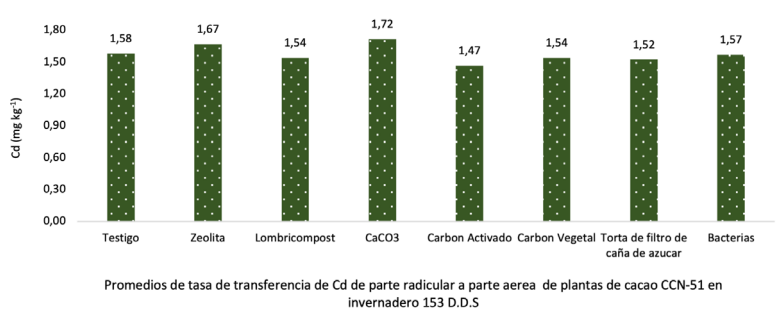
El tratamiento con carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) registró el mayor valor de transferencia ( $1,72 \text{ mg kg}^{-1}$ ), seguido por zeolita ( $1,67 \text{ mg kg}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento testigo presentó un valor intermedio

( $1,58 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Por su parte, el tratamiento con carbón activado mostró el valor más bajo ( $1,47 \text{ mg kg}^{-1}$ ), indicando una menor movilización del Cd desde la parte radicular hacia la parte aérea.

En este contexto, los resultados reflejan variaciones en la dinámica de transferencia del Cd en función de las enmiendas aplicadas; sin embargo, estas diferencias deben interpretarse dentro de las condiciones controladas del experimento en invernadero.

**Figura 8.** Promedios de tasa de transferencia de Cd desde la raíz hacia la parte aérea de plantas de cacao CCN-51 en invernadero en aplicaciones de enmiendas orgánicas y químicas para mitigación de Cd, 153 D.D.S

**Figure 8.** Mean cadmium transfer rate from roots to the aerial parts of CCN-51 cocoa plants grown under greenhouse conditions with applications of organic and chemical amendments for cadmium mitigation at 153 days after sowing (DAS).



#### IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la aplicación de enmiendas orgánicas y minerales no modificó significativamente el pH del suelo, el cual se mantuvo en un rango estrecho (5,05–5,35), lo que sugiere una adecuada capacidad tampón del sistema edáfico bajo condiciones controladas. Este comportamiento indica que la mitigación del cadmio (Cd) no estuvo asociada a cambios en la acidez del suelo, sino a procesos fisicoquímicos específicos que regulan su biodisponibilidad. En este sentido, la estabilidad del pH sugiere que mecanismos como la adsorción superficial, la complejación con materia orgánica y la interacción con minerales del suelo desempeñaron un papel predominante en la inmovilización del Cd, tal como ha sido reportado en suelos tropicales (Montalvo et al., 2019) (Adarme et al., 2024).

En términos de crecimiento vegetal, la ausencia de diferencias significativas en altura de planta, diámetro de tallo y producción de biomasa ( $p > 0,05$ ) indica que las concentraciones de Cd presentes no generaron efectos fitotóxicos durante el periodo evaluado. Este comportamiento sugiere una tolerancia fisiológica del clon CCN-51, evidenciando que la acumulación del metal no interfirió de manera directa con los procesos de crecimiento ni con la asignación de carbono en etapas tempranas del desarrollo. De manera consistente, la estabilidad en la biomasa aérea y radical confirma que el Cd no afectó significativamente la actividad metabólica del cultivo bajo las condiciones experimentales evaluadas. Resultados similares han sido reportados por Chavez et al., (2015) y

Argüello et al., (2019) quienes indican que especies tolerantes pueden mantener su crecimiento mediante mecanismos de exclusión radicular y detoxificación intracelular.

En contraste, las variables relacionadas con el Cd mostraron respuestas diferenciadas entre tratamientos. La reducción en la concentración y contenido de Cd en la parte aérea, particularmente en tratamientos con materiales carbonosos, evidencia que las enmiendas influyeron en la dinámica de absorción y distribución del metal. En términos cuantitativos, la disminución observada respecto al tratamiento testigo confirma una menor movilización del Cd hacia los tejidos aéreos, lo cual constituye un indicador directo de mitigación. Este comportamiento puede atribuirse a la capacidad de materiales como el carbón activado para adsorber Cd en el suelo, reduciendo su disponibilidad para la absorción radicular, lo cual ha sido ampliamente documentado en sistemas agrícolas contaminados (Oliva et al., 2020).

El análisis del contenido de Cd en la parte aérea y radicular permitió explicar con mayor precisión los mecanismos de mitigación observados. La mayor retención del metal en el sistema radicular sugiere la activación de procesos de inmovilización interna, como la unión del Cd a componentes de la pared celular y su posterior secuestro en vacuolas, lo que reduce su movilidad hacia la parte aérea. Estos mecanismos han sido ampliamente descritos como estrategias fisiológicas de tolerancia en plantas expuestas a metales pesados, donde la compartimentalización intracelular y la fijación en estructuras subcelulares limitan la translocación

del metal (González & Zapata, 2008; Lux et al., 2011).

La disminución del contenido de Cd en la parte aérea observada en tratamientos específicos, especialmente aquellos que incluyeron materiales carbonosos, sugiere que la mitigación del metal podría estar asociada a una reducción de su biodisponibilidad en el suelo y a la modificación de los gradientes de concentración que regulan su translocación. Materiales como el carbón activado presentan alta afinidad por el Cd, favoreciendo su adsorción y limitando su absorción radicular, lo cual ha sido reportado como un mecanismo efectivo para reducir la transferencia del metal hacia órganos aéreos en sistemas agrícolas (Zhou et al., 2024).

La tasa de transferencia de Cd desde la raíz hacia la parte aérea refuerza esta interpretación, evidenciando variaciones en la eficiencia de translocación entre tratamientos. Una menor transferencia del metal indica una mayor retención radicular, lo que reduce el riesgo de acumulación en tejidos aéreos de interés económico. Este comportamiento es consistente con estudios que destacan la importancia de la regulación del transporte interno del Cd como mecanismo clave para limitar su acumulación en cultivos agrícolas (Barraza et al., 2021).

Desde una perspectiva integrada, los resultados evidencian que las enmiendas evaluadas no influyen significativamente en el crecimiento del cultivo, pero sí modifican de manera relevante la dinámica de absorción, acumulación y distribución del Cd. Este desacople entre crecimiento vegetal y acumulación de metales ha sido reportado en especies tolerantes, donde los mecanismos de defensa permiten mantener la funcionalidad fisiológica sin reducir la acumulación del contaminante.

Desde el punto de vista aplicado, los resultados sugieren que el uso de enmiendas, particularmente materiales carbonosos, constituye una estrategia efectiva para reducir la acumulación de Cd en la parte aérea del cacao. Este aspecto es relevante en el contexto de la inocuidad alimentaria, dado que la acumulación de Cd en el grano representa una limitante para la comercialización internacional del cacao.

No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela debido a las condiciones controladas del experimento en invernadero, lo que limita la extrapolación directa a condiciones de campo. Factores como la heterogeneidad del suelo, la dinámica hídrica y la actividad microbiana pueden modificar la biodisponibilidad del Cd y la eficiencia de las enmiendas. Asimismo, el periodo experimental correspondió a una fase temprana del cultivo (153 días), por lo que no se evaluó la acumulación del metal en el grano, que constituye el principal órgano de interés económico.

En este contexto, futuras investigaciones deben orientarse a validar la eficacia de estas enmiendas bajo condiciones de campo y a lo largo de ciclos productivos completos, considerando diferentes genotipos de cacao y niveles de contaminación edáfica. Esto permitirá fortalecer la comprensión de los mecanismos de mitigación del Cd y contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles en sistemas cacaoteros tropicales.

## V. CONCLUSIONES

Las enmiendas orgánicas y minerales evaluadas no generaron efectos estadísticamente significativos sobre las variables de crecimiento del cultivo (pH del suelo, altura de planta, diámetro de tallo y producción de biomasa), lo que indica que, bajo las condiciones controladas del experimento, la presencia de cadmio (Cd) no afectó de manera directa el desarrollo vegetativo del clon CCN-51 durante la fase inicial del cultivo.

En contraste, las variables asociadas a la dinámica del Cd evidenciaron respuestas diferenciadas entre tratamientos, confirmando que la aplicación de enmiendas influye en los procesos de absorción, acumulación y distribución del metal en el sistema suelo-planta. En particular, el uso de materiales carbonosos, como el carbón activado, mostró la mayor eficiencia en la reducción del contenido de Cd en la parte aérea, alcanzando valores cercanos a  $27,85 \mu\text{g kg}^{-1}$ , en comparación con el tratamiento testigo, que registró aproximadamente  $35,08 \mu\text{g kg}^{-1}$ , evidenciando una disminución relevante en la acumulación del metal en tejidos de interés agronómico.

Asimismo, la menor tasa de transferencia de Cd desde la raíz hacia la parte aérea observada

en el tratamiento con carbón activado indica una reducción en la movilidad interna del metal, lo que sugiere un efecto de inmovilización tanto a nivel edáfico como fisiológico. Este comportamiento resalta el papel de las enmiendas en la regulación de la biodisponibilidad del Cd y en la limitación de su translocación hacia órganos aéreos.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados indican que el uso de enmiendas, particularmente materiales carbonosos, constituye una estrategia viable para mitigar la acumulación de Cd en plantas de cacao, contribuyendo potencialmente a reducir el riesgo de contaminación del grano y a mejorar la competitividad del cultivo en mercados internacionales.

No obstante, dado que el estudio se desarrolló bajo condiciones controladas de invernadero y en una etapa temprana del cultivo, los resultados deben interpretarse con cautela. En este sentido, se recomienda validar la eficacia de estas enmiendas en condiciones de campo y a lo largo de ciclos productivos completos, incluyendo la evaluación de la acumulación de Cd en el grano, con el fin de fortalecer su aplicabilidad en sistemas cacaoteros tropicales.

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### V. REFERENCIAS

- Adarme, C., Ágreda, J., Brandao, P., & Castillo, E. (2024). Cadmium availability in rhizosphere and non - rhizosphere soils in cacao farms in Santander, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1254), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13301-x>
- Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & 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., Maurice, L., Schreck, E., Zouiten, C., & Boidot, M. (2021). Beyond cadmium accumulation: Distribution of other trace elements in soils and cacao beans in Ecuador. *Environmental Research*, 192, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110241>
- Chavez, E., He, Z., Stoffella, P., Mylavarapu, R., Li, Y., Moyano, B., & Baligar, V. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern. *Science of the Total Environment*, 533, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.106>
- González, D., & Zapata, O. (2008). Mecanismo de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de La Sociedad Botánica de México*, 61(82), 53–61. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-21282008000100005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-21282008000100005)
- Intriago, F., Chávez, G., Vásquez, L., Alvarado, K., Escobar, R., Vera, J., Radice, M., & Raju, M. (2023). Evaluación del contenido de cadmio y caracterización fisicoquímica de almendras y pasta de cacao (*Theobroma cacao*). *Innovaciencia*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.15649/2346075X.3411>
- Lux, A., Martinka, M., Vaculik, M., & White, P. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere : a review. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 21–37. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq281>
- Montalvo, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., & Smolders, E. (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>
- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., & Leiva, S. (2020). Cadmium uptake in native cacao trees in agricultural lands of Bagua, Peru. *Agronomy*, 10(10), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101551>
- Salazar, M., Vásquez, L., Villamarín, J., Benítez, D., Moncayo, J., García, G., Ramírez, A., & Rodríguez, S. (2025). Sustainable application of biofertilizers to improve Agronomic performance , productivity , and soil health in cacao (*Theobroma cacao* L.) propagated sexually and asexually. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 5, 1–16. <https://doi.org/10.56294/saludcyt20252286>

- Vasquez, L., Alvarado, K., Intriago, F., Vera, J., Raju, N., & Prasad, R. (2024). Banana and apple extracts with efficient microorganisms and their effect on cadmium reduction in cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *Discover Food*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00205-5>
- Vásquez, L., Cevallos, C., Uvidia, M., Segobia, S., & Plua, J. (2025). Evaluación de métodos fermentativos de cacao Nacional y CCN-51, induciendo microorganismos en yute y cajas rohan para mejora organoleptico. *Revista Luna Azul*, 60, 168–181. <https://doi.org/10.17151/luaz.2025.60.10>
- Vásquez, L., Erazo, C., Vera, J., & Intriago, F. (2022). Induction of rhizobium japonicum in the fermentative mass of two varieties of cacao (*Theobroma Cacao* L.) as a strategy for the decrease of cadmium. *International Journal Of Health Sciences*, 6(3), 11354–11371. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS3.8672>
- Vera, J., Benavides, J., Vásquez, L., Alvarado, K., Reyes, J., Intriago, F., Naga, M., & Castro, V. (2023). Efectos de dos métodos fermentativos en cacao (*Theobroma cacao* L.) trinitario, inducido con *Rhizobium japonicum* para disminuir cadmio. *Revista Colombiana de Investigación Agroindustriales*, 10(1), 95–106. <https://doi.org/10.23850/24220582.5460>
- Vera, J., Radice, M., Vásquez, L., & Intriago, F. (2024). Peril químico de 12 clones tipo Nacional de pasta de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Univeridad y Sociedad*, 16(1), 126–136.
- Zhou, L., Zhou, L., Wu, H., Li, J., Kong, L., & Yang, H. (2024). Effects of applying biochar on soil cadmium immobilisation and cadmium pollution control in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Agriculture*, 14(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071068>