

EFECTOS DE LA APLICACIÓN DE CADMIO AL SUELO EN PLANTAS DE CACAO DEL CLON AS-CP 2661¹

*Jhon Alexander Villalaz-Pérez²; José Ezequiel Villarreal-Núñez³;
Adolfo Santo-Pineda⁴; Abiel Gutiérrez-Lezcano⁵; Agustín Merino⁶*

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue evaluar la absorción máxima de cadmio (Cd) en diferentes órganos de las plantas de cacao, así como determinar la bioacumulación y traslocación que presenta el clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo. Se utilizó un diseño completamente al azar, con seis tratamientos y tres repeticiones. El suelo utilizado fue del distrito de Almirante, Bocas del Toro, extraído hasta una profundidad de 30 cm. Se trató con CdSO₄ diluido y aplicado en la superficie en dosis de 0 mg·kg⁻¹; 4 mg·kg⁻¹; 8 mg·kg⁻¹; 12 mg·kg⁻¹; 16 mg·kg⁻¹ y 20 mg·kg⁻¹. Pasados los seis meses, se tomaron muestras de suelo a dos profundidades (0 a 15 cm y 15 a 30 cm), así como de raíces, tallos y hojas, para determinar las concentraciones de Cd. Se analizaron los factores de bioacumulación y traslocación para conocer si el genotipo evaluado es hiperacumulador o exclusor de Cd. En los resultados se pudo comprobar que a medida que se incrementaba la dosis de Cd aplicado aumentó la concentración biodisponible en el suelo. Las hojas presentaron mayor concentración de Cd, seguido por las raíces y los tallos. El comportamiento de la planta de cacao con factores de bioacumulación del Cd mayor de 1 y de translocación menor a 1, corresponden a una planta fitoacumuladora. Se concluye que el clon evaluado AS-CP-2661 no transfiere el metal de la raíz hacia el tallo y las hojas, en dosis aplicada en el suelo menores de 8 mg·kg⁻¹.

Palabras claves: Acumulación, disponibilidad, inceptisol, translocación, suelos ácidos.

¹Recepción: 17 de febrero de 2023. Aceptación: 03 de octubre de 2023. Proyecto de Investigación e Innovación para el cultivo de cacao en sistemas agroforestales en Bocas del Toro y Comarcas.

²Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP), Centro de Innovación Agropecuaria Divisa (CIA Divisa). e-mail: jvillalaz14@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5382-5549>

³IDIAP, CIA Divisa. e-mail: jevilla38@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1317-1960>

⁴IDIAP, CIA Divisa. e-mail: asantospineda@gmail.com; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9561-2103>

⁵IDIAP, CIA Bocas del Toro. e-mail: abiel.gutierrez@yahoo.es

⁶Universidad Santiago de Compostela. Lugo, España. Departamento de Edafología y Química Agrícola. e-mail: agustin.merino@usc.es; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3866-7006>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

EFFECTS OF THE APPLICATION OF CADMIUM TO THE SOIL IN COCOA PLANTS OF THE CLONE AS-CP 2661

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate The maximum absorption of cadmium (Cd) in different organs of the cocoa plants was evaluated, as well as to determine the bioaccumulation and translocation presented by the clone AS-CP 26-61, when applying different concentrations of Cd in the soil. A completely randomized design was used, with six treatments and three repetitions. The soil used was from the Almirante district, Bocas del Toro, extracted to a depth of 30 cm. The soil was treated with diluted CdSO₄ and applied to the surface in doses of 0 mg·kg⁻¹; 4 mg·kg⁻¹; 8 mg·kg⁻¹; 12 mg·kg⁻¹; 16 mg·kg⁻¹ and 20 mg·kg⁻¹. After six months, soil samples were taken at two depths (0 to 15 cm and 15 to 30 cm), as well as roots, stems and leaves, to determine Cd concentrations. Bioaccumulation and translocation factors were analyzed to find out if the evaluated genotype is Cd hyperaccumulator or excluder. According to the results, it was possible to verify that as the doses of Cd applied doses increased, the concentrations of bioavailable Cd in the soil increased. The leaves presented the highest Cd concentration, followed by roots and stems. The cocoa plant behavior with Cd bioaccumulation factors greater than 1 and translocation factors less than 1, corresponds to a phytoaccumulator plant. It is concluded that the evaluated clone AS-CP-2661 does not transfer the metal from the root to the stem and leaves, in doses applied to the soil of less than 8 mg·kg⁻¹.

Keywords: Accumulation, availability, acid soils, inceptisol, translocation.

INTRODUCCIÓN

Importancia económica del cultivo de cacao

La planta de cacao, *Theobroma cacao* L., pertenece a la familia de las Malváceas, especie descrita por Linneo en el 1753 (Avendaño et al., 2013). La especie, originaria de la Amazonía, se cultiva en más de 50 países de regiones tropicales de cuatro continentes (África, América, Asia y Oceanía), 23 de ellos en América.

En todos estos países donde se cultiva el cacao, tiene gran importancia económica, social, ambiental y particularmente cultural, e impulsa las economías (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Organización Mundial de la Salud [FAO/OMG], 2014; Arvelo Sánchez et al., 2017). Es destacable que en muchas partes del



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

mundo es cultivado por pequeños agricultores, contribuyendo de esta manera al desarrollo rural (Lehmann et al., 2014). Siendo así, su producción representa una de las principales fuentes de ingreso para más de 50 millones de personas, contribuyendo al incremento del PIB de estos países (López, 2020).

La comercialización del grano de cacao es afectada por la presencia de concentraciones altas de metales pesados (entre ellos el Cd), lo que perjudica a los productores de países que cultivan el grano de cacao, entre estos Panamá. En general, los valores de contenido de Cd en los granos de cacao reportados a través de América Latina y el Caribe (ALC) y otras partes del mundo, superan las regulaciones presentadas en el reglamento de la Unión Europea (UE) aplicados en enero del 2019 por la cual afectará a los productores de cacao en la región (Meter et al., 2019; Engbersen et al., 2019).

Para lo antes expuesto, la UE 488/2014 (UE, 2014) incluye para niveles máximos de Cd los derivados del chocolate que se presentan a continuación: chocolate de leche con sólidos de cacao inferiores a 30% una concentración de Cd de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; chocolate con sólidos de cacao inferiores al 50% y chocolates con leche con sólidos de cacao superiores o iguales al 30%, una concentración de Cd de $0,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Chocolates con sólidos de cacao superiores o iguales al 50%, $0,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; cacao en polvo un nivel de concentración de Cd de $0,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Existen muchos factores (p.ej., edafoclimáticos y fisiológicos) que influyen en la disponibilidad de los metales pesados, por la toxicidad de ellos que están clasificados químicamente en leves, medios y altamente toxico, entre estos últimos está Cd, Pb y Hg, por la cual no lo modifica ni el suelo ni la genética de la planta. De igual manera, estas propiedades pueden influir sobre el impacto ambiental que pueden tener los metales regulando su disponibilidad o manteniéndolos en la fase residual o unido a la materia orgánica, lo que hace reducir su impacto al tener menor posibilidad de ser absorbidos por la planta (Bravo et al., 2014; Casteblanco, 2018).

Entre las principales características que se relacionan con la movilidad y disponibilidad de los metales pesados en el suelo se encuentran el pH, la materia orgánica



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(MO), el contenido de arcilla, los óxidos, los carbonatos y el potencial redox (Alloway, 2013; Barraza et al., 2017; Argüello et al., 2019). Por otra parte, Alloway (2013) menciona que las concentraciones en el suelo de Cd de origen geológico no superan $1,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ encontrando niveles de $16,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, que se asocian a procesos de meteorización y tipo de materia parental.

Se debe tomar en cuenta algunas herramientas que nos ayuden a conocer cuánto acumulan o translocan las concentraciones de Cd por la planta, es por eso que se consideraron dos factores principales: Factor de bioacumulación con siglas en inglés (FBC) y traslocación de la planta (FT).

Factor de bioacumulación y traslocación de la planta

La absorción de metales pesados por la planta puede depender de diversos factores tanto químicos como físicos (p.ej., textura superficial de la hoja, condiciones ambientales) que pueden llevar a una bioacumulación o traslocación del metal (Cd) dentro de la planta (Shahid et al., 2017) y el ingreso del Cd se puede dar por absorción foliar y/o radical (Song et al., 2020). Además de las propiedades del suelo mencionada, uno de los mayores problemas en la planta de cacao es su capacidad de fitoacumular el Cd (Antoine et al., 2017; AbuShady et al., 2017).

El factor de bioacumulación (FBC) se utiliza como indicador de la capacidad de captación que presenta una planta a un metal pesado (Cd) presente en el sistema (Sutlohmann et al., 2020). Si el FBC es mayor a 10 se considera potencialmente hiperacumuladora, si es mayor a 1 se considerada como acumuladora del Cd, en cambio si es menor a 1 este factor es considerado como exclusora (Verbruggen et al., 2009).

Por otro lado, el factor de traslocación (FT), es la capacidad de transportar los metales pesados desde las raíces hasta la parte aérea de la planta, pudiendo interpretarse si el factor FT si es mayor a 1 la planta de cacao presenta una gran capacidad para movilizar el Cd desde la raíz a la hoja o al tallo (Dinu et al., 2020).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El material genético mejorado que se utilizó en esta investigación es el codificado como colección Panamá (AS-CP 26-61) fino de aroma, que puede ser de gran interés para los productores de Panamá, por sus alto rendimiento y calidad (Gutiérrez, 2020). El genotipo mejorado, fue injertado sobre el patrón IMC-67 (peruano) resistente a muchas enfermedades (Hidalgo, 2014). Este genotipo mejorado (AS-CP 26-61) puede alcanzar una altura de 2,5 m, con ramas de color marrón, presenta hojas de 34,5 cm de largo de color verde claro con ausencia de antocianinas, la semilla húmeda expresa una coloración blanca y una pigmentación de color blanca para la flor. La semilla presenta una forma elíptica, mientras el fruto es rugoso, con pesos mayores a 627 g, encontrando más de 33 semillas por frutos (Gutiérrez, 2020).

Estudio similar al nuestro se realizó en Perú, por investigadores como Arévalo-Hernández et al. (2021) en donde se determinó las altas concentraciones de Cd en diferentes genotipos de plantas de cacao (ICT-1292, PH-17, CCN-51, ICS-39 y TSH-565). Del mismo modo, Arévalo-Gardini et al. (2017) investigaron la distribución y acumulación de metales pesados en hojas y granos de cacao concluyendo que las plantaciones con diversidad de clones de cacao muestran diferencias en la acumulación de Cd tanto en hojas como en granos.

Lo anteriormente expuesto sugiere que utilizar material de cacao genéticamente mejorado puede ser una estrategia para disminuir la concentración de Cd en la planta, derivando a la calidad del grano que puede ayudar a los pequeños productores a mejorar la economía en esa región de Bocas del Toro. Es por esto se propuso evaluar la bioacumulación y traslocación de la concentración de Cd en la planta de cacao del clon AS-CP 26-61, al aplicar diferentes concentraciones de Cd en el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio del estudio

El ensayo de investigación fue realizado durante el año 2020 a 2021 en una casa de vegetación semi controlada, donde se utilizó un suelo proveniente de un área representativa cultivados con cacao del distrito de Almirante y cuyas características fisicoquímicas y materia orgánica (MO) se presentan en el Cuadro 1.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cuadro 1. Características del suelo utilizado en las macetas o potes.

pH																Cd		Textura		
H ₂ O	N	MO	COS	C:N	P	CiCe	K	Ca	Mg	Al	Cu	Zn	Fe	Mn	total	bd	A	L	Arc	
-----%-----			Mg·kg ⁻¹				-----cmol (+) kg ⁻¹ -----				-----mg·kg ⁻¹ -----				----- %-----					
-----Profundidad (0-15 cm)-----																				
6,6	0,3	1,4	2,41	8,04	24	26	0,3	19	6	0	3	6	58	46	0,3	0,01	55	29	16	
-----Profundidad (15-30 cm)-----																				
6,6	0,4	1,4	2,41	6,03	24	25	0,3	19	6	0	3	6	58	48	0,1	0,01	53	30	17	

Parámetros evaluados en el suelo: pH (H₂O) relación 1:10

El suelo fue tratado con CdSO₄ diluyendo con agua tipo II y aplicando en la superficie las diferentes dosis (T1: 0 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo; T2: 4 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo; T3: 8 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo; T4: 12 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo; T5: 16 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo; T6: 20 mg de Cd·kg⁻¹ de suelo).

Metodología de muestreo y preparación de muestras en el laboratorio

A los seis meses de aplicados cada tratamiento, se tomaron muestras de suelos a dos profundidades (0 a 15 cm y 15 a 30 cm). En ellas se eliminaron las raicillas, piedras o cualquier material que podía alterar los análisis. Las mismas fueron secadas al aire y trituradas en un mortero de ágata y pasadas a través de un tamiz de malla de nylon de diámetro de 2 mm. Este suelo fue utilizado para conocer los elementos biodisponibles e intercambiables sin incluir el Cd. Para este metal se tomó el suelo retenido en el tamiz de diámetro de 2 mm y separado en otra malla con diámetro de 0,063 mm tomando en cuenta la guía de muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente (MINAM), 2014.

Para el muestreo de las hojas se utilizaron cinco hojas sanas de cada una de ellas próxima al ápice por cada tratamiento y repetición, utilizando metodologías de Puentes et al. (2016). Las hojas, tallos y raíces fueron lavadas con agua ultrapura (tipo II) y secadas en la estufa a 60° C durante 48 horas, para posterior determinar la concentración de Cd a cada parte de la planta.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Determinación de pH, materia orgánica, variables químicas y textura en el suelo

El pH se determinó por potenciometría con la relación 1:2,5 (suelo-agua) utilizando técnicas descritas por Teixeira et al. (2017). La MO se realizó mediante metodología del carbono del suelo a través del método propuesto por Walkley y Black (1934). El N total se realizó por digestión Kjeldahl (Bremner y Mulvaney, 1983). Para la extracción de elementos biodisponibles (Cu, Fe, Zn, Mn, Cd) y los cationes como Ca, Mg y K se utilizó la solución extractora Mehlich 3, tomando una relación suelo-agua 1:10 (Mehlich, 1984). Fue cuantificada por espectrofotómetro de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnicas por llama (FAAS). El Al intercambiable se extrajo con solución extractora KCl 1M, según Díaz-Romeu y Hunter (1978). La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICe) se realizó mediante la sumatoria de bases Ca, Mg, K +Al. Por otro lado, el porcentaje de saturación de aluminio (Sat. Al %) se determinó mediante el cociente de $(Al\ (%)/CICe * 100)$. El análisis físico granulométrico de textura del suelo se determinó mediante la metodología de Bouyoucos (1962).

Las concentraciones totales de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, K, Ca y Mg en suelo, hojas, frutos y granos de cacao se evaluaron por extracción asistida con microondas utilizando reactivos en concentraciones puras de HNO₃ y HCl en una relación 3:1 y posteriormente analizadas por espectrofotometría de absorción atómica de fuente continua de alta resolución de técnicas por llama, según metodologías EPA 3051A (United States Environmental Protection Agency [USEPA], 2007).

Para mantener una confiabilidad en los datos obtenidos en el análisis, se pudo determinar la exactitud y precisión (Cuadro 2) por medio de los límites de detección (LOD) y límites de cuantificación (LOQ) por cada elemento evaluados del equipo de absorción atómica de fuente continua.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Cuadro 2. Límites de detección (LOD), cuantificación (LOQ) y R² ajustado del espectrofotómetro de absorción atómica del Laboratorio de fertilidad de suelos y agua del IDIAP de Divisa, distrito de Santa María, provincia de Herrera, República de Panamá.

N°	Elemento	Unidad	LOD	LOQ	R ² (ajustado)
1	Cu	mg·kg ⁻¹	0,031	0,093	0,999
2	Zn	mg·kg ⁻¹	0,001	0,002	0,996
3	Fe	mg·kg ⁻¹	0,007	0,022	0,994
4	Mn	mg·kg ⁻¹	0,003	0,008	0,984
5	Cd	mg·kg ⁻¹	0,001	0,002	0,999
6	K	cmol (+) kg ⁻¹	0,037	0,112	0,996
7	Ca	cmol (+) kg ⁻¹	0,004	0,012	0,969
8	Mg	cmol (+) kg ⁻¹	0,128	0,383	0,992

LOD: límite de detección; LOQ: límite de cuantificación.

El factor bioacumulador (BCF) se determinó como la relación de la concentración del Cd en la planta y la concentración del Cd biodisponible en el suelo (Sut-lohmann et al., 2020).

$$BCF = \frac{CC \text{ (elemento en la plana)}}{CC \text{ (elemento en el suelo)}}$$

Donde: BCF es el factor de bioacumulación; CC es la concentración del elemento (Cd) en la planta y en el suelo biodisponible (mg·kg⁻¹). Si FBC>10 indica que la planta es hiperacumuladora. Si FBC>1 se considera acumuladora, y si el factor FBC<1 se considera exclusora.

El factor de traslocación (TF) en la planta se determinó de la siguiente forma: El cociente de la concentración del metal (Cd) hoja o tallo (fuste) del árbol de cacao y la concentración del Cd de la raíz (Dinu et al., 2020).

$$BCF = \frac{CC \text{ (elemento en la plana)}}{CC \text{ (elemento en el suelo)}}$$

Donde: FT es el factor de traslocación; CC es el elemento (Cd) en las hojas, tallo y raíz en (mg·kg⁻¹). Si FT >1 indica que la planta presenta una gran capacidad para movilizar el Cd desde la raíz a la hoja o tallo.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Análisis estadísticos

Para verificar las diferencias entre tratamientos, los datos fueron evaluados por análisis de varianza y las medias de sus tratamientos fueron comparadas por la prueba LSD Fisher $P < 0,05$ estadísticas descriptivas (medias, coeficientes de variación). Por otra parte, se realizaron correlaciones de Pearson en variables de suelo y partes de la planta (hojas, tallos y raíces), con el propósito de conocer el efecto del incremento de las dosis en estas variables.

Se realizaron gráficos de barras para el Cd extraído en suelo (Total y biodisponible) por cada profundidad y concentración de Cd en la planta (hojas, tallos y raíces). Los análisis fueron realizados usando el software InfoStat versión 2008 (Di Rienzo et al., 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Cd total y biodisponible en el suelo

Las concentraciones totales y biodisponibles de Cd aumentan con las dosis crecientes de Cd aplicado al suelo (Figura 1). El nivel de Cd en el suelo sin tratar fue inferior al valor promedio de $0,50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ para suelos agrícolas, señalado por Kabata-Pendias (2010) y de $0,43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2002). Estudios realizados por Bowie y Thornton (1985) en suelos agrícolas, encontraron en suelos sin tratar concentraciones de Cd en el suelo de 1 a $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

A pesar de que las aplicaciones de Cd fueron realizadas en la superficie, la capa más profunda de suelo mostró aumentos importantes. Las concentraciones de Cd biodisponibles siguieron una tendencia similar a la del Cd total.

El aumento del Cd total aplicado en la superficie pudo haber afectado en las capas más profundas debido a que el suelo utilizado mantuvo un bajo contenido de MO del suelo (1,4% Snoeck et al., 2016) lo cual pudo haber afectado la biodisponibilidad de la concentración del Cd, ya que la movilidad del metal pesado depende de varios factores p.ej., el pH y la MO del suelo; (Kabata – Pendias, 2004; Huertos y Baena, 2008; Kabata-Pendias, 2010; Rosas-Patiño et al., 2017).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

El Cd está ligado estrechamente al contenido de la MO del suelo, la cual forma complejos organometálicos, inmovilizando la absorción de éstos por las plantas (Arévalo-Gardini et al., 2016).

En algunos países donde se realizaron estudios de Cd en el suelo, se pudo demostrar que niveles elevados de Cd que superan la concentración máxima adicionada en este estudio, pueden ser de origen antrópicas y otras naturales p.ej. Inglaterra y Gales 0,7-41 mg·kg⁻¹ (McGrath y Loverland, 1992); USA 0,16-41 mg·kg⁻¹ (Burt et al., 2003).

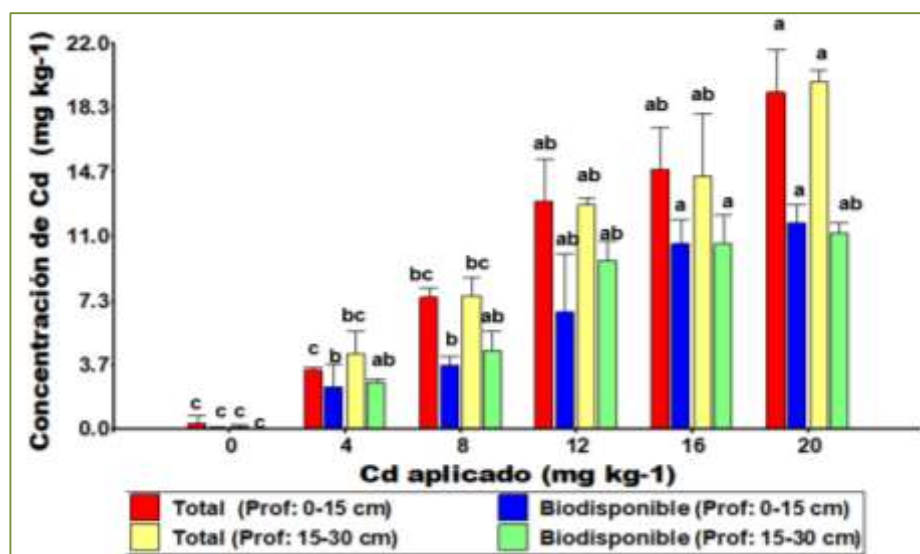


Figura 1. Concentraciones de Cd total y biodisponible en el suelo determinadas a dos profundidades del suelo (0 a 15 cm y 15 a 30 cm) con incrementos de dosis de Cd aplicadas al suelo.

Niveles de concentraciones de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao

A pesar de que el Cd no es un elemento esencial para la planta, este estudio ayuda a comprender la importancia que tiene este metal en la absorción y acumulación en las partes de la planta (hojas, tallos y raíces de cacao).

Las concentraciones de Cd en las partes de la planta en estudio aumentaron a medida que se incrementaban las dosis aplicadas en hojas>raíces<tallos. Las máximas concentraciones en hojas, raíces y tallo fueron en torno a 12, 9 y 6 mg·kg⁻¹, respectivamente, en dosis aplicada de Cd en el suelo de 16 mg·kg⁻¹ (Figura 2).



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Otro estudio señala que la mayor concentración de Cd total lo tiene las raíces>tallos>hojas (Llatance et al., 2018). Estudios realizados por Torres y Otiniano, (2021) en cinco diferentes genotipos de cacao informaron que la mayor acumulación de Cd lo presentaron las raíces de cacao.

El Cd y el Zn son algunos de los elementos que las plantas absorben en mayor cantidad a través de las hojas por ser metales muy móviles en el suelo (Intawongse y Dean, 2006). Algunos autores, como Engbersen et al. (2019), demostraron que el orden de absorción del Cd varía con el genotipo cultivado. Esto mismo fue divulgado por Song et al. (2020), quienes mencionan que la menor o mayor concentración de Cd en la planta de cacao, está influenciado por el material genético utilizado. Por esta razón, se debe tomar en cuenta el portainjerto para los estudios, ya que juegan un factor muy importante en la absorción de los metales pesados (Albacete et al., 2015; Lewis et al., 2018) aunque hace falta realizar comparaciones con otros tipos de clones de cacao.

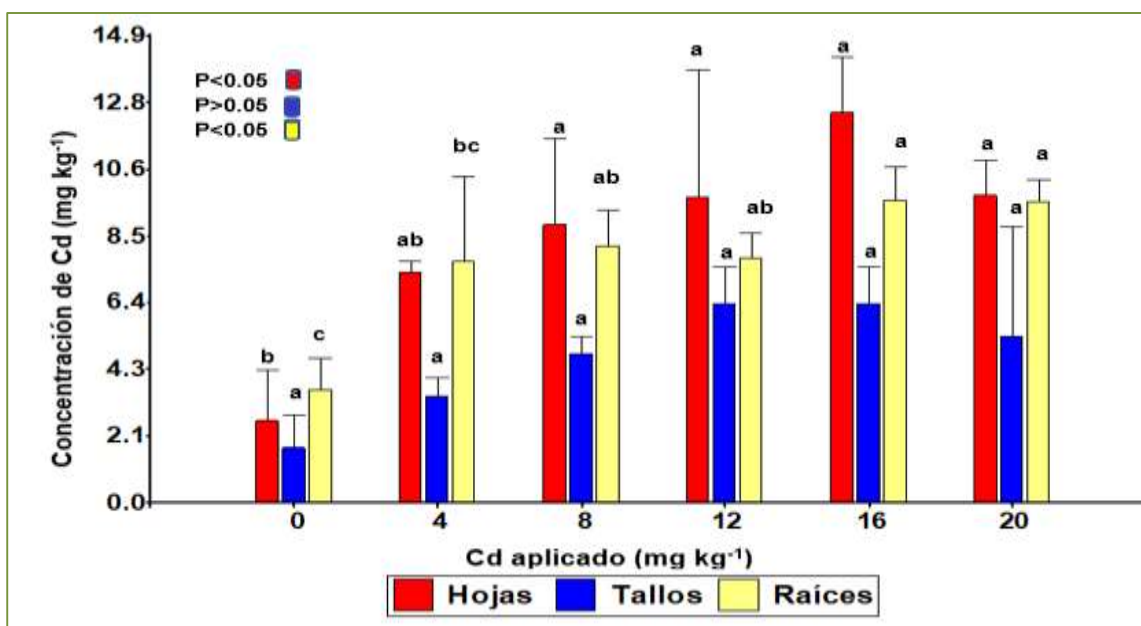


Figura 2. Niveles de concentración de Cd en hojas, tallos y raíces de cacao del genotipo AS-CP-2661 al incrementar dosis de Cd aplicadas al suelo.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Factor de bioacumulación y traslocación de la planta

El factor de bioacumulación (FBC) y factor de traslocación (FT) son indicadores críticos para evaluar la capacidad de una planta para acumular metales (Yazdanbakhsh et al., 2020).

En ambas profundidades estudiadas, el FBC llega a decrecer a medida que aumentan las dosis aplicadas en el suelo, manteniendo una tendencia cuando sobrepasa la dosis de Cd de 8 mg·kg⁻¹. Esto pudo deberse al proceso de hormé debate (refiriéndose al proceso en que la exposición a una dosis baja de un agente químico que es dañino en una concentración más altas induce un beneficio sobre la célula o el organismo; Calabrese et al., 2007). Este factor de traslocación (FT) presentó valores muy interesantes ya que, al aumentar las dosis de Cd aplicadas al suelo, el FT en las hojas se incrementó hasta llegar a la dosis de 12 mg·kg⁻¹. Mientras que, en los tallos se incrementó a medida que se aumentaba la dosis de Cd aplicada al suelo (Cuadro 3).

Tomando la dosis aplicada de Cd 12 mg·kg⁻¹ en ambas profundidades y los factores evaluados, podemos interpretar que el FBC es mayor a 1 y el FT es menor a 1. Este genotipo evaluado se comporta como una planta fitoacumuladora o fitoextractora (Baker, 1981; Clemente Huachen et al., 2021) y no transfiere la concentración de Cd absorbido en las raíces hacia su parte aérea (Alvarado et al., 2011).

Cuadro 3. Factores de bioacumulación (FBC) y traslocación (FT) de la planta total de cacao y partes de ella (hojas y tallos) aplicado al genotipo mejorado AS-CP-2661.

Dosis Aplicadas	FBC	FBC	FT	FT
	Planta Total	Planta Total	Hojas	Tallos
PROFUNDIDAD				
mg·kg⁻¹	0-15	15-30	FACTORES	
4	7	9	0,70	0,51
8	5	4	1,03	0,61
12	3	3	1,68	0,84
16	3	3	1,48	1,14
20	3	3	1,18	1,75



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

CONCLUSIONES

- Al aplicar dosis crecientes de Cd en el suelo, ayudó a comprobar la movilidad del metal pesado desde la dosis baja a la más alta.
- La mayor acumulación de Cd que obtuvo la planta de cacao la presentó en las hojas, seguido de las raíces y tallos.
- Tomando como referencia el factor de bioacumulador en la planta (mayor a 1), el Clon mejorado AS-CP 2661 se considera como una planta fitoacumuladora o fitoextractora, absorbiendo el contaminante (Cd) por las raíces, pero no logra movilizarlo hacia el tallo y hojas ya que el factor de transferencia o traslocación es menor a 1.
- Altos contenidos de Cd en el suelo (mayores de $12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) pueden provocar la alta transferencia del metal hacia las partes aéreas de la planta (hojas y tallos).
- Se debe realizar ensayos similares, utilizando otros tipos de genotipos mejorados y evaluando otros patrones de injertos para conocer si aumentando las dosis de concentraciones del Cd u otro metal pesado puede afectar el comportamiento de absorción de la planta.

REFERENCIAS

- AbuShady, M., Fathy, H., Fathy, G., A., Abd El Fatah, S., Ali, A., y Abbas, M. (2017). "Blood lead levels in a group of children: the potential risk factors and health problems." *Journal de Pediatria*, 93(6), 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2016.12.006>
- Albacete, A., Martínez-Andújar, C., Martínez-Pérez, A., Thompson, A. J., Dodd, I. C., y Pérez-Alfocea, F. (2015). Unravelling rootstock x scion interactions to improve food security. *Journal of experimental botany*, 66(8), 2211-2226. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv027>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Alvarado, C. J., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, E., Sánchez-Yañez, J. M., y Villegas, J. (2011). Hongos micorrízicos arbusculares y la fitorremediación de plomo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 357-364.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000400008

Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils*. Springer Netherlands. pp.11-50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2

Antoine, J., Hoo Fung, L., y Grant, CH. (2017). Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. *Toxicology Reports*, 4, 181–187.

<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006>

Argüello, D., Chávez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., y Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: a nationwide survey in Ecuador. *Sci Total Environ*, 649, 120–127.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>

Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Barraza, F., Farfán, A., He, Z., y Baligar, V. C. (2021). Growth and nutritional responses of wild and domesticated cacao genotypes to soil Cd stress. *Science of the Total Environment*, 763, 144021.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144021>

Arévalo-Gardini, E., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. C., y 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, 792-800.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.122>

Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., y He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada*, 15(2), 81-89.
<http://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>

Arvelo Sánchez, M. A., González León, D., Maroto Arce, S., Delgado López, T., y Montoya Rodríguez, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao: prácticas latinoamericano de Cooperación para la Agricultura*. San José, C.R.: IICA. 165 p.
<https://pdfslide.net/documents/manual-tecnico-del-cultivo-de-cacao-practicas-latinoa-manual-tecnico-del.html>

Avendaño, A. C. H., Mendoza, L. A, Hernández, G. E., López, G. G., Martínez, B. M., Caballero, P. J. F., Guillen, D. S., y Espinosa, Z. S. (2013). Mejoramiento genético participativo en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agro productividad*, 6(5), 71-80.
<https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/487>

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. *Environ Pollut* 29, 950-963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>

Baker, J. M. (1981). Accumulators and Excluders Strategies in Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of Plant Nutrition*. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643-654.
<https://doi.org/10.1080/01904168109362867>.

Bowie, S. H. U., y Thornton, I. (1985). *Environmental geochemistry and health*. D. Reidel Publishing Company, Lancaster, PA.

Bravo, I. D. S. B., Arboleda, C. A. A., y Peinado, F. J. M. (2014). Efecto de la Calidad de la Materia Orgánica asociada con el Uso y Manejo de Suelos en la Retención de Cadmio en Sistemas Altoandinos de Colombia. *Acta Agronómica*, 63(2), 164-174.
<http://dx.doi.org/10.15446/acag.v63n2.39569>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Bremner, J. M., y Mulvaney, C. S. (1983). Nitrogen total. In: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis. Part II. American Society of Agronomy. No 9 in Agronomy Series. Madison, Wisconsin. USA. pp. 595-624.* <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy Journal*, 54, 464-465. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

Burt, R., Wilson, M. A., Keck, T. J., Dougherty, B. D., Strom, D. E. y Lindahl, J. A. (2003). Trace Element Speciation in Selected Smelter-Contaminated Soils in Anaconda and Deer Lodge Valley, Montana, USA. *Advances in Environmental Research*, 8, 51-67.

Calabrese, E. J., Bachmann, K. A., Bailer, A. J., Bolger, P. M., Borak, J., Cai, L., Cedergreen, N., Cherian, M. G., Chiueh, Ch. C., Clarkson, T. W., Cook, R. R., Diamond, D. M., Doolittle, D. J., Dorato, M. A., Duke, S. O., Feinendegen, L., Gardner, D. E., Hart, R. W., Hastings, K. L., Hayes, A. W., y Mattson, M. P. (2007). Biological stress response terminology: integrating the concepts of adaptive response and preconditioning stress within a hormetic dose–response framework. *Toxicology and applied pharmacology*, 222(1), 122-128.

Castebianco, J. (2018). «Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation». En: *La Granja* 27.1, 21-35. <https://bit.ly/33ffMhn>

Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Pfuño, J. D. L., Pariona Aguilar, L. A., y Gutiérrez Vélchez, P. P. (2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). *Acta Agronómica*, 70(2), 163-170. <https://doi.org/10.15446/acag.v70n2.94208>

Díaz-Romeu, R., y Hunter, A. (1978). Metodologías de Muestreo de suelos. Análisis químico de suelos y tejido vegetal y de Investigaciones en invernadero. Turrialba, Costa Rica. C.R. pp.70. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A4008e/A4008e.pdf>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

- Dinu, C., Vasile, G. G., Buleandra, M., Popa, D. E., Gheorghe, S., y Ungureanu, E. M. (2020). Translocation and accumulation of heavy metals in *Ocimum basilicum* L. plants grown in mining-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2141-2154. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02550-w>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini – Italy, M. G., González, L., Tablada, M., Robledo, C. W. (2015). InfoStat Version (2008). Transfer Center InoStat, FCA, National University of Cordoba, Argentina.
- Engbersen, N., Gramlich, A., Lopez, M., Schwarz, G., Hattendorf, B., Gutierrez, O., y Schulin, R. (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*, 678, 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.001>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud. (2014). *Comisión del Código Alimentarius*. Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias CX/CF 15/9/6. diciembre de 2014. ftp://ftp.fao.org/codex/meetings/cccf/cccf9/cf09_06s.pdf
- Gutiérrez, A. (2020). Caracterización Morfológica de tres genotipos criollos promisorios de *Theobroma cacao* L. *Ciencia Agropecuaria*, (30),150-169. <http://revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/ciencia-agropecuaria/article/view/134/98>
- Hidalgo, N. (2014). Algunos métodos de propagación del cultivo de cacao *Theobroma cacao* L. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Dirección Regional Brunca. INFOAGRO.
- Huertos, E. G., y Baena, A. R. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *MACLA, revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 48-60.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Intawongse, M., y Dean, J. R. (2006). Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Additives and Contaminants*, 23(1), 36-46.
<https://doi.org/10.1080/02652030500387554>

Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). Taylor and Francis Group. CRC Press. Michigan, USA. 505 p.

Kabata-Pendias, A. (2004). Soil-plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*, 122(2), 143-149.

Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K., Eliseev, A. V. y Levermann, A. (2014). Cambios futuros en las trayectorias de tormentas extra tropicales y baroclinicidad bajo el cambio climático. *Cartas de investigación ambiental*, 9 (8), 084002.
<http://stacks.iop.org/ERL/9/084002/mmedia>

Lewis, C., Lennon, A. M., Eudoxie, G., y Umaharan, P. (2018). Genetic variation in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of the Total Environment*, (640-641), 696–703.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.365>

Llatance, W. O., Gonza, C. J., Guzmán, W., y Pariente, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Comunidad Nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33(1), 63-75. <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1156>

López, Y., Cunias, M., y Carrasco, Y. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Universidad y Sociedad*, 12(3), 344-352.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2218-36202020000300344

McGrath, S. P., y Loveland, P. J. (1992). *The Soil Geochemical Atlas of England and Wales*. Blackie Academic and Professional.



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Meter, A., Atkinson, R. J., y Laliberte, B. (2019). *Cadmium in Cocoa from Latin America and the Caribbean – Analysis of research and potential solutions for mitigation*. Bioersivity International, Rome.

https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1505/Cadmio_en_el_cacao_de_America_Latina_y_el_Caribe.pdf

Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in soil science and plant analysis*, 15(12), 1409-1416.

<https://doi.org/10.1080/00103628409367568>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para Muestreo de Suelos*. En el marco del Decreto Supremo No 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.

https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf

Puentes, P. Y. J., Menjivar, J. C., y Aranzazu, F. (2016). Concentration of nutrients in leaves, a tool for nutritional diagnosis in cocoa. *Agronomía Mesoamericana*, 27(2), 329-336.

Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y.J., y Menjívar Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541.

https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., y Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of hazardous materials*, 325, 36-58.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>

Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J, Bastide, P., y Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. In: Lichtfouse (ed) *Sustainable agriculture reviews*. Springer International Publishing, Switzerland 19, 155–202. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Song, Y., Jin, L., y Wang, X. (2020). Cadmium absorption and transportation pathways in plants. *International journal of phytoremediation*, 19(2), 133-141.

<https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1207598>

Sut-Lohmann, M., Jonczak, J., y Raab, T. (2020). Phyto filtration of chosen metals by aquarium liverwort (*Monosoleum tenerum*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 188, 109844. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109844>

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., y Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise do solo. 3.ed. rev. e ampl. Brasilia, DF: Embrapa, 573 p. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>

Torres, C. P., y Otiniano, A. J. (2021). Innovación tecnológica en cacao andino Producto 4. Informe sobre absorción de cadmio y manejo agronómico y su validación en vivero.

Unión Europea. (2014). Reglamento (CE) No 488/2014, que modifica el Reglamento (CE) 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Reglamento de la Comunidad Europea, Bélgica, 138/78.

<https://www.boe.es/doue/2014/138/L00075-00079.pdf>

United States Environmental Protection Agency. (2002). Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) Orientación complementaria para desarrollar niveles de detección de suelos para sitios de superfondos.

United States Environmental Protection Agency. (2007). Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils. Revision 1. Washington, DC.

Verbruggen, N., Hermans, C., y Schat, H. (2009). Mechanisms to cope with excess arsenic or cadmium in plants. *Current opinion in plant biology*, 12(3), 364-372.

<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.001>



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Yazdanbakhsh, A., Alavi, S. N., Valadabadi, S. A., Karimi, F., y Karimi, Z. (2020). Heavy metals uptake of salty soils by ornamental sunflower, using cow manure and biosolids: A case study in Alborz city, Iran. *Air, Soil and Water Research*, 13, 1178622119898460. <https://doi.org/10.1177/117862211989>

Walkley, A., y Black, A. I. (1934). An examination of the method for determination soil organic matter, and a proposed codification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1934SoilS..37...29W/doi:10.1097/00010694-193401000-00003



Este trabajo está licenciado bajo una [licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)