

NOTA TÉCNICA

ACUMULACIÓN DE CADMIO EN CACAO: UNA BARRERA A SUPERAR PARA LA EXPORTACIÓN DEL GRANO Y SUS DERIVADOS

Rolando Cifuentes Velásquez
rcifuen@uvg.edu.gt,

Isabel Alonzo Flores
ialonzo@uvg.edu.gt

Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios - CEAA

El cadmio es un metal pesado que se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. La problemática de este elemento, no esencial y sin función metabólica alguna en las plantas, radica en su elevada toxicidad, su larga vida media y en la capacidad para ser acumulado por los seres vivos (Capó, 2007).

Principales fuentes de Cd

Es ampliamente reportado en la literatura (Meter *et al.*, 2019) que la acumulación de este elemento en la

naturaleza proviene de diferentes fuentes, incluyendo fuentes naturales y antropogénicas (Figura 1). Entre las fuentes naturales se incluyen las erupciones volcánicas, la meteorización de las rocas que más adelante dan origen al suelo mineral, la deposición de sedimentos por erosión y las cenizas de incendios forestales. Las fuentes antropogénicas están asociadas al uso de insumos agrícolas, a la actividad industrial (minería, fundición y combustibles fósiles) y al reciclaje de la hojarasca y cáscaras de cacao ricas en Cd.

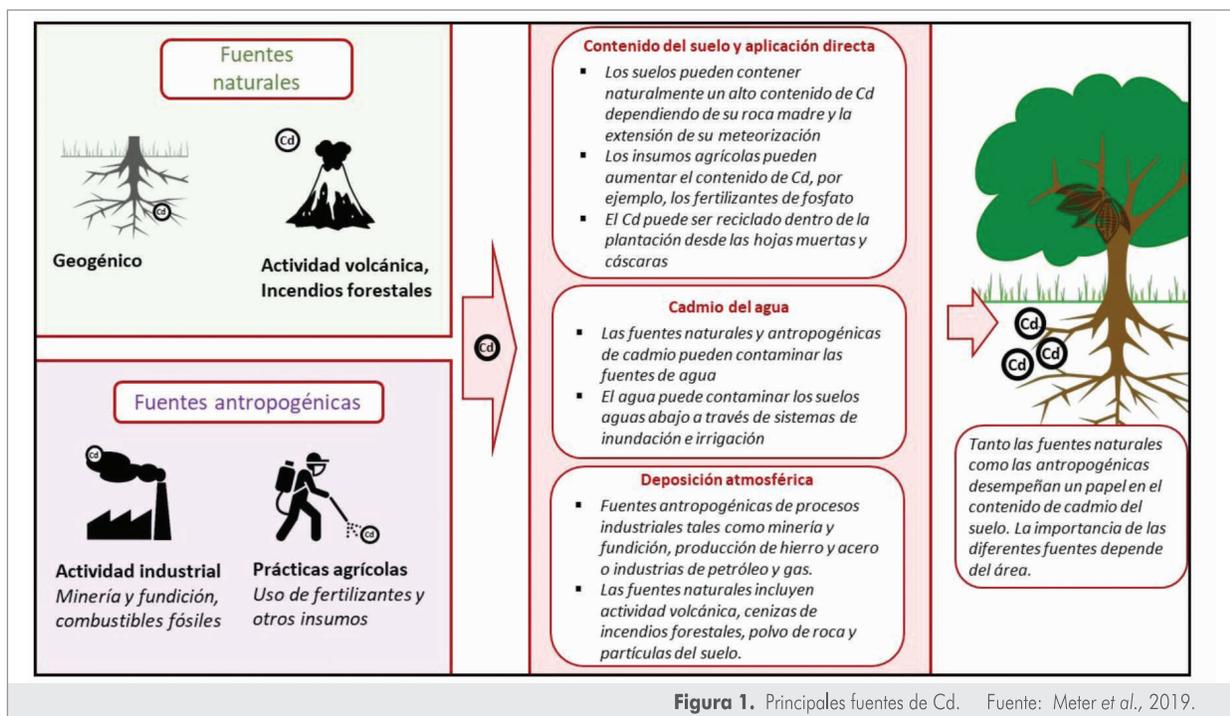


Figura 1. Principales fuentes de Cd. Fuente: Meter *et al.*, 2019.

Se ha determinado que las concentraciones de Cd en granos de cacao en las áreas productoras difieren en todo el mundo. Estas tienden a ser más altas en América Latina, seguido por Asia y por último África. El fuerte efecto del origen geográfico sugiere que el Cd en el cacao generalmente no se origina de la actividad antropogénica, ya que estas actividades ocurren a nivel mundial. De hecho, múltiples investigadores han encontrado que las altas concentraciones de Cd en el suelo están asociadas con suelos aluviales de material sedimentario. La concentración de Cd en algunas rocas y minerales se presentan en el cuadro 1 (CODEX, 2020).

Aunque algunos autores han sugerido que el uso de fertilizantes, es una de las fuentes principales de Cd en el suelo (Cuadro 2), Vanderschueren *et al.* (2021) sugieren que es muy poco probable que los fertilizantes fosfatados sean el principal origen de contaminación de Cd en el suelo a gran escala. Gramlich *et al.* (2017) realizaron mediciones de la concentración de Cd en fertilizantes fosfatados en un ensayo de comparación de sistemas a largo plazo en Bolivia, y encontraron una concentración media de Cd de 102 mg Cd/kg P_2O_5 . Este valor es alto en comparación con los fertilizantes disponibles en Europa con media de 28 mg Cd/kg P_2O_5 . A una dosis anual de 20 kg P_2O_5 /ha, la fertilización adicional alrededor de 2g de Cd/ha al año. Esto representa la adición neta de 0.001 mg Cd/kg de suelo al año, lo cual representa una acumulación de 0.1 mg Cd/kg de suelo después de 100 años.

Considerando que la mayoría de los productores de cacao son pequeños agricultores que no suelen utilizar fertilizantes, este escenario aparenta ser bastante irreal, por lo que este cálculo indicaría que los fertilizantes minerales no son la principal fuente de Cd en las plantaciones de cacao, o al menos no a gran escala.

Los fangos procedentes de aguas residuales que se utilizan para la agricultura (Rodríguez *et al.* (2008), al igual que el uso de enmiendas con estiércol de granja, calizas minerales y otros insumos agrícolas (CODEX, 2020) también son considerados fuentes de contaminación por Cd. (Cuadro 2).

El agua de riego también puede contener Cd. Una aplicación de riego anual de 500 mm que contenga 1 μ g Cd/L equivale a 5 g de Cd/ ha-año, lo cual conduce a una acumulación de 0.25 mg Cd/ kg suelo a un riego sostenido después de 100 años. Esta acumulación es más probable en áreas afectadas por actividades mineras (Vanderschueren *et al.*, 2021).

Con relación al aporte de Cd en la hojarasca seca de cacao, se estima una concentración promedio de 2.6 mg Cd/kg de hojarasca seca. A una producción anual de 3.8 t hojarasca

Cuadro 1. Concentración de Cd en algunas rocas y minerales.

Material	mg Cd/kg
Rocas ígneas	
Riolitas	0.03 - 0.57
Granitos	0.01 - 1.6
Basalto	0.01 - 1.6
Rocas sedimentarias	
Esquistas y arcillas	0.017 - 11
Esquistas negros	0.30 - 219
Piedras areniscas y conglomerados	0.019 - 0.4
Carbonatos	0.007 - 12
Fosforitas	10 - 980
Carbón	0.01 - 300
Rocas metamórficas	
Gneis	0.1 - 0.26
Eclogita	0.04 - 0.26
Minerales	
Esfalerita (SZn)	< 5,000
Galena (SPb)	< 5,000
Tetrahedrita - Tennantita (CuSZn)	< 2,400
Metacinnabar (HgS)	< 117,000

Fuente: CODEX, (2020) y Patiño (s.f)

Cuadro 2. Aporte de Cd en algunos insumos y materiales de uso agrícola.

Material	mg Cd/kg
Fertilizantes fosfatados	0.1 - 170
Fertilizantes nitrogenados	0.05 - 8.5
Productos fitosanitarios (plaguicidas)	1.38 - 1.94
Estiércol	0.3 - 0.8
Lodos de aguas residuales	2 - 1,500

Fuente: elaboración propia con datos de CODEX (2020)

seca/ha, el flujo anual de Cd devuelto al suelo sería de aproximadamente 10 g Cd/ha, el cual distribuido uniformemente a una profundidad de 15 cm de suelo aportaría alrededor de 0.005 mg Cd/kg de suelo cada año.

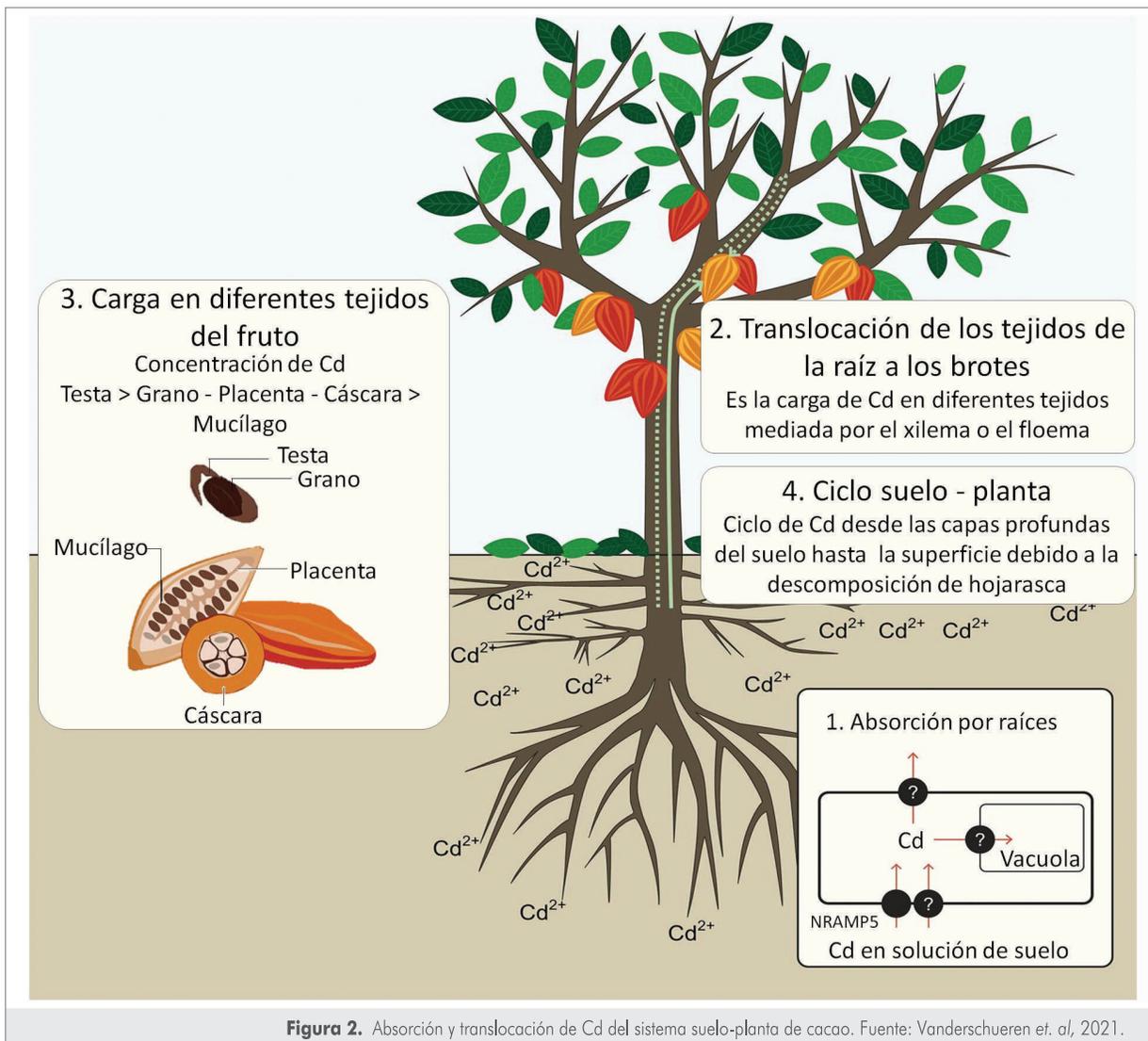


Figura 2. Absorción y translocación de Cd del sistema suelo-planta de cacao. Fuente: Vanderschueren et. al, 2021.

Contenido de Cd en el suelo

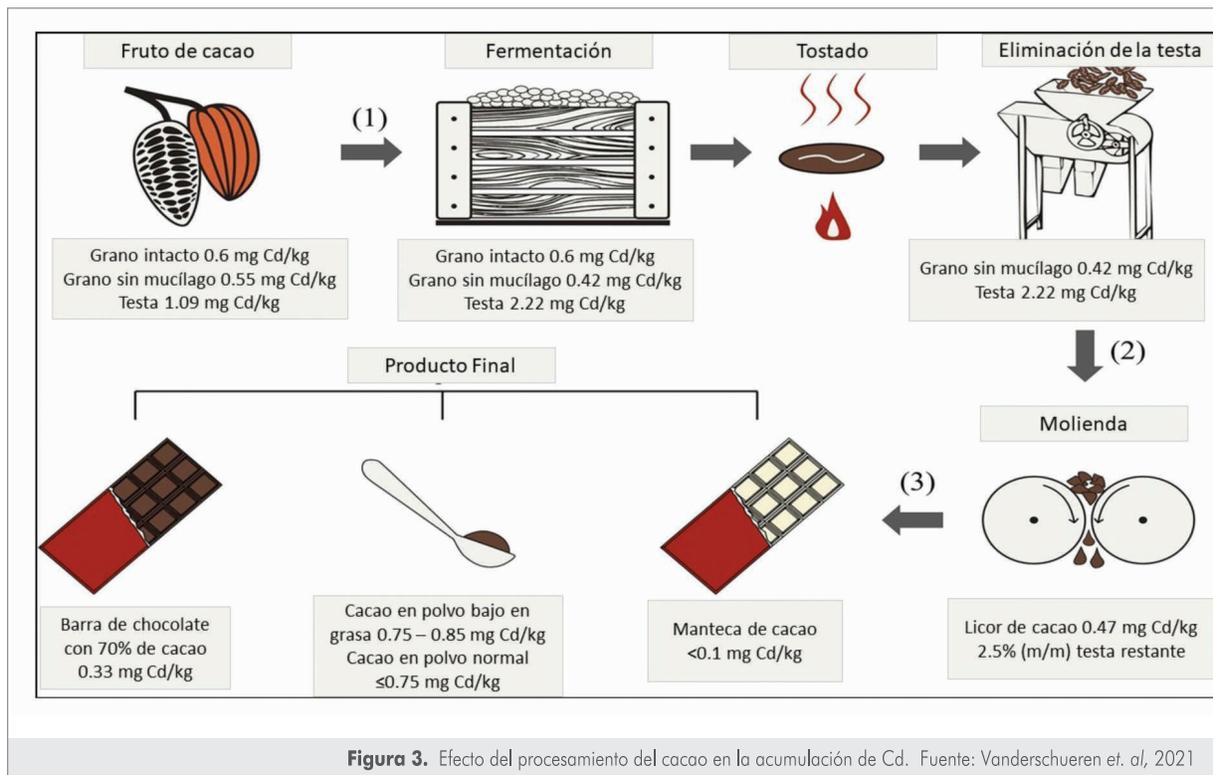
De acuerdo con Lindsay (1979), el contenido natural de Cd en el suelo varía de 0.01 a 0.7 mg Cd/kg con un promedio probable de 0.06 mg Cd/kg de suelo. Sin embargo, de acuerdo con Smolders y Mertens (2013) y He et al. (2015), el cadmio se encuentra de forma natural con concentraciones en el suelo que oscilan entre 0.1 y 1.0 mg Cd/kg y medias globales estimadas de 0.1 a 0.3 mg Cd/kg. Aunque los autores reportan diferentes valores, se reconoce que la concentración natural de Cd en el suelo es relativamente baja.

Vanderschueren et al. (2021) también reportan que varios estudios del perfil del suelo sugieren que las concentraciones de Cd en el suelo disminuyen con el aumento de la profundidad en las plantaciones de cacao. La concentración de Cd en los primeros 15 cm de suelo es aproximadamente 1.5 veces mayor que la concentración de Cd en la profundidad

15 a 60 cm. Esto podría deberse a la descomposición de hojarasca de la biomasa aérea que ha acumulado Cd, a la actividad antropogénica con el uso de insumos, o bien una combinación de ambas.

La dinámica del Cd está fuertemente afectada por el pH. En suelos ácidos el cadmio se intercambia fácilmente. Sin embargo, en suelos alcalinos este metal no es móvil ya que se precipita en forma de carbonatos y fosfatos insolubles. La fijación de Cd es mayor en los suelos con alto contenido de materia orgánica, textura fina, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de aluminio intercambiable (Sánchez, 2016).

En Guatemala, la mayor parte de las plantaciones de cacao han sido establecidas en suelos generados a partir de roca caliza (norte de Guatemala), de origen volcánico (boca costa) o a partir de material fluvio - volcánico (partes bajas de la costa sur (González-Martínez, 2013).



Transferencia de Cd del suelo a la planta

El factor de transferencia (FT) de Cd del suelo a la planta se define como la relación entre la concentración de Cd existente en la planta o en un órgano de ella y la concentración de Cd en el suelo. El FT permite identificar las características de acumulación de Cd y permite comprender el proceso de traslocación de Cd en el sistema. Debido a los altos valores de FT suelo-planta, el cacao se ha descrito como acumulador de Cd (Vanderschueren *et al.*, 2021).

Por ser un metal no esencial para las plantas no existen mecanismos de entrada específicos para el cadmio. Entre las proteínas responsables de la entrada de cadmio a la célula cabe destacar el transportador específico del calcio LCT1 y la proteína IRT1 transportadora de Zn y Fe. Una vez en la planta el cadmio se acumula principalmente en la raíz y va disminuyendo de manera decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas (Figura 2) (Rodríguez *et al.*, 2008; Vanderschueren *et al.*, 2021). En la naturaleza, las plantas no tienen un mecanismo para discriminar entre los elementos esenciales para su ciclo de vida y aquellos sin función metabólica alguna como el caso del Cd.

El Cd en el procesamiento del cacao

Según Barraza *et al.* (2017), en Ecuador el Cd medido en granos de cacao sin pelar y sin fermentar oscila entre 1.02 a 1.37 mg Cd/kg, mientras que en licor de cacao oscila

entre 1.47 a 3.88 mg Cd/kg. Esto significa que la concentración de Cd se incrementa después de la fermentación y del procesamiento. Yanus *et al.* (2014) reportan concentraciones de Cd en granos de cacao sin fermentar de 0.072 ± 0.001 mg/kg, en la testa de 0.085 ± 0.001 mg/kg y en cacao en polvo de 0.125 ± 0.011 mg Cd/kg, confirmando un incremento de cadmio después del proceso de producción.

Según Vanderschueren *et al.* (2021) existen 4 aspectos dentro del proceso poscosecha que pueden afectar las concentraciones de Cd en el producto final derivado del cacao (Figura 3).

Se ha sugerido que la fermentación causa la movilización de Cd dentro de los granos de cacao debido a la acidificación de la semilla de cacao, reduciendo la concentración de Cd en los granos sin mucílago, pero incrementando la concentración en la testa. La eliminación de la testa se da posteriormente al tostado mediante un proceso que rompe los granos y luego se muelen las semillas de cacao para obtener licor de cacao.

En segundo lugar es probable que la eliminación óptima de la testa de cacao reduzca la concentración de Cd en el producto final, ya que las concentraciones de Cd en la testa son generalmente mayores, en un factor aproximadamente de 2, en comparación con las concentraciones de Cd en el grano.

El tercer aspecto, es que el Cd se reparte principalmente en los sólidos de cacao sin grasa, por lo que los productos de consumo final elaborados con los mismos granos de cacao pueden tener concentraciones muy distintas según el producto previsto, es decir, las concentraciones de Cd en manteca de cacao son muy bajas, mientras que el cacao en polvo reducido en grasa contiene concentraciones altas de Cd, mayores incluso al licor de cacao y/o los granos de cacao.

Por último, una práctica muy común es mezclar el cacao de diferentes fuentes geográficas durante el proceso de producción. Considerando las diferencias regionales que existen en las concentraciones de Cd en cacao, se puede mezclar cacao de distintos orígenes para garantizar las concentraciones aceptables de Cd en el producto final. No obstante esta práctica requiere un mapeo nacional de concentraciones de Cd para poder hacer las elecciones del material a combinar.

Normativa de Cd y su impacto en el comercio

El Cd puede llegar hasta el grano de cacao y aún permanecer después del procesamiento de chocolate. Esto puede ser perjudicial para la salud humana. (Rodríguez et al., 2008).

Los productos derivados del cacao se consumen en pequeñas cantidades en comparación con alimentos básicos. Sin embargo, pueden ser consumidos de forma cotidiana por los niños, principalmente como cacao en polvo por lo que pueden llegar a ser una fuente importante de Cd en el organismo en detrimento de la salud (López et al. 2021).

La preocupación por los efectos que causa el Cd a la salud humana ha resultado en regulaciones para limitar las concentraciones de Cd en suelos y alimentos. En el año 2014, la Unión Europea (UE) aprobó una reglamentación sobre límites máximos de cadmio permitidos en cacao y

chocolate (Cuadro 3). Se trata del reglamento UE No. 488/2014, el cual modifica el reglamento CE No. 1881/2006.

Como se puede observar, los niveles máximos permitidos en las regulaciones de la UE son para productos de chocolate mas no para grano de cacao. No obstante, los compradores deben poder relacionar el nivel de Cd en el grano de cacao con el producto final. Para ello se utiliza una ecuación para estimar el nivel máximo de cadmio en la masa de cacao para que el producto del chocolate permanezca por debajo del umbral permitido (Meter et al. 2019).

$$ML_{CM} = \frac{ML_{EU.P}}{X_{\%P}}$$

En donde:

ML_{CM} = Nivel máximo de cadmio en la masa del cacao (mg/kg)

$ML_{EU.P}$ = Nivel máximo permitido de la UE en el producto terminado P (mg/kg)

$X_{\%P}$ = Porcentaje de masa de cacao en el producto terminado P

A nivel mundial la vigencia del Reglamento UE No. 488/2014 generó un impacto en el comercio. Perú reportó la disminución de exportaciones de cacao en grano y en polvo a la UE, lo cual provocó la caída de los precios de este producto. Indonesia mencionó que la norma internacional vigente para niveles de cadmio era suficiente para proteger la salud humana e instó a la Unión Europea a armonizar los niveles

Cuadro 3. Niveles máximos de Cd permisibles en productos derivados del cacao.

Producto	Nivel máximo permisible (mg Cd/kg)
Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao < 30 %	0.10
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao < 50%; Chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 30%	0.30
Chocolate con un contenido de materia seca total de cacao ≥ 50%	0.80
Cacao en polvo vendido al consumidor final o como ingrediente en cacao en polvo edulcorado vendido al consumidor final (chocolate para beber)	0.60

Fuente: Reglamento de la Comisión Europea 488/2014

máximos de cadmio con lo establecido en las normas, orientaciones y recomendaciones internacionales para no afectar el comercio. Ecuador Insistió en la necesidad de adoptar medidas para que el Reglamento Europeo N° 488/2014 no se convirtiera en una restricción al comercio.

A pesar de que el reglamento entró en vigor en 2015, la UE concedió un período de transición de cuatro años para el chocolate y otros productos, acatando las preocupaciones de los países productores (OMC, 2021). Esto implica que la entrada oficial del reglamento fue a partir del año 2019.

Medidas de mitigación del Cd

En diferentes países de Latinoamérica y del Caribe se han realizado estudios para identificar soluciones de mitigación para reducir los niveles de cadmio en granos de cacao.

Es poco probable que exista una solución para reducir Cd en cacao debido a la heterogeneidad en las condiciones ambientales, del suelo, manejo del cultivo y el uso de diferentes genotipos. Según Oeste et al, (2002) y Basta y McGowen (2004), la aplicación de enmiendas minerales al suelo es una medida de mitigación efectiva. Esto aumenta la proporción del metal en la fase sólida del suelo por medio de la precipitación química. La inmovilización no tiene como propósito remover el metal contaminante, sino reducir su disponibilidad y reactividad. No obstante, su incorporación es limitada debido al sistema de raíces del árbol.

Estudios del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT) en Perú identificaron un total de 11 genotipos de cacao que acumularon poco cadmio y son potencialmente útiles para utilizarlos como patrón para reducir la absorción y translocación de Cd (MOCCA, 2020; Vanderschueren et al., 2021).

Según Durango et al. (2021) otra técnica de mitigación de cadmio en el suelo es mediante enmiendas orgánicas. Al incrementarse los sitios de intercambio y la formación de complejos estables, decrece la biodisponibilidad del metal para ser absorbido por la planta. Si las enmiendas contienen bases, el pH del suelo puede incrementar y de esa manera el cadmio puede estar menos biodisponible en la solución del suelo (OMC, 2021).

Canchignia et al. (2021) consideran que el enriquecimiento del microbiota del suelo mediante enmiendas como bokashi contribuyen a la inmovilización de cadmio. Así mismo, pueden encontrarse bacterias u hongos capaces de favorecer la precipitación del metal o inclusive absorber el cadmio sobre las paredes celulares.

Otras técnicas de biorremediación sugieren la aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares del género *Glomus*, especialmente especies como *Diversispora spura*,

Rhizoglofus sp. y *Claroideoglofus etunicatum* los cuales pueden reducir la translocación de Cd hacia la planta (Sandoval et al., 2020).

La aplicación de zinc ya sea directamente al suelo o por aplicaciones foliares, reduce la absorción de Cd en la zona radicular debido a que se saturan los mecanismos de absorción a través de los cuales el Cd puede ingresar a la planta y por lo tanto su concentración en el grano (LATIZA, 2008).

Por último, en función del tipo y concentración de contaminantes, las condiciones del campo, nivel de limpieza requerida y tipo de planta se pueden utilizar distintos mecanismos de fitorremediación. La fitovolatilización es una técnica de descontaminación en donde las plantas absorben metales del suelo que son convertidos biológicamente en forma volátil y luego son liberados a la atmósfera por volatilización, sin embargo, el contaminante no se elimina por completo, únicamente se transfiere del suelo a la atmósfera. Otra técnica es la fito-extracción, en la cual los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación) y posteriormente son translocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (Peña et al. 2021).

Situación del Cd en sitios productores de cacao en Guatemala

Hasta el año 2019 los estudios sobre la acumulación de cadmio en cacao en Guatemala eran prácticamente inexistentes. Como parte del proyecto Cd del Programa CRIA del IICA, en el período 2019-2021 el Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios-CEAA de la UVG implementó el primer estudio en Guatemala. Se buscó conocer el estado del Cd en el suelo y su acumulación en el grano de cacao en varias regiones de Alta Verapaz. El estudio se llevó a cabo en las sub-regiones de Lachuá, Cahabón, Polochic y Lanquin, las cuales incluyen los municipios más productores de cacao de Alta Verapaz.

En general se determinó que el contenido medio de Cd en el suelo es 0.27 ± 0.31 mg Cd/kg suelo y en grano 0.82 ± 1.11 mg Cd/kg de grano seco. Alrededor del 37% de las muestras de grano presentaron un contenido de Cd superior a 0.6 mg Cd/kg, que corresponde al límite permisible para cacao en polvo de acuerdo a la normativa de la Unión Europea.

La acumulación de Cd en el grano está asociada al contenido total de Cd en el suelo y a la edad de la planta. En todas las subregiones, el contenido de Cd disminuyó con la profundidad del suelo, sugiriendo que la acumulación de Cd en los primeros 10 cm de suelo está asociado al manejo de los sitios de producción, al ciclaje de la horrajaca de cacao rica en Cd o ambos. En general, la región de Lachuá es diferente a las regiones de Cahabón, Polochic y Lanquin. Se considera que los resultados constituyen un aporte importante para la comercialización del cacao de la región.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Tomando en consideración que se han identificado las principales zonas con problemas de acumulación de Cd en cacao, es importante realizar estudios encaminados a la mitigación de este elemento no esencial para las plantas y dañino a la salud humana.
- El cacao es un cultivo asociado principalmente a pequeños y medianos productores, por lo que se considera prioritario el apoyo a dicho sector.
- También se considera importante completar el mapeo de la distribución del Cd y su acumulación en las diferentes regiones productoras de cacao del país, incluyendo la región Sur occidental y El Petén.
- El problema de acumulación del Cd en el suelo y en los granos de cacao tiene solución. Se debe conocer inicialmente la condición química del suelo, y también se debe identificar y validar las experiencias exitosas de otros países de la región, a fin de acortar la curva de aprendizaje en la búsqueda de soluciones de mitigación de este elemento.
- Tomando en consideración que el Cd es tomado por las plantas esencialmente del suelo, en la Figura 4 se presenta un diagrama que ilustra cómo las propiedades del suelo impactan sobre la acumulación de Cd. Es importante recordar que las plantas toman el Cd exclusivamente de la solución o agua del suelo. Esta fracción está en un intercambio rápido con el Cd y otros metales adsorbidos en el complejo de intercambio de los coloides orgánicos (humus) e inorgánicos (principalmente arcillas) del suelo. La reducción de la fracción de Cd en la solución del suelo y en el complejo de intercambio es prioritario para reducir la disponibilidad y la acumulación de Cd en el grano del cacao.

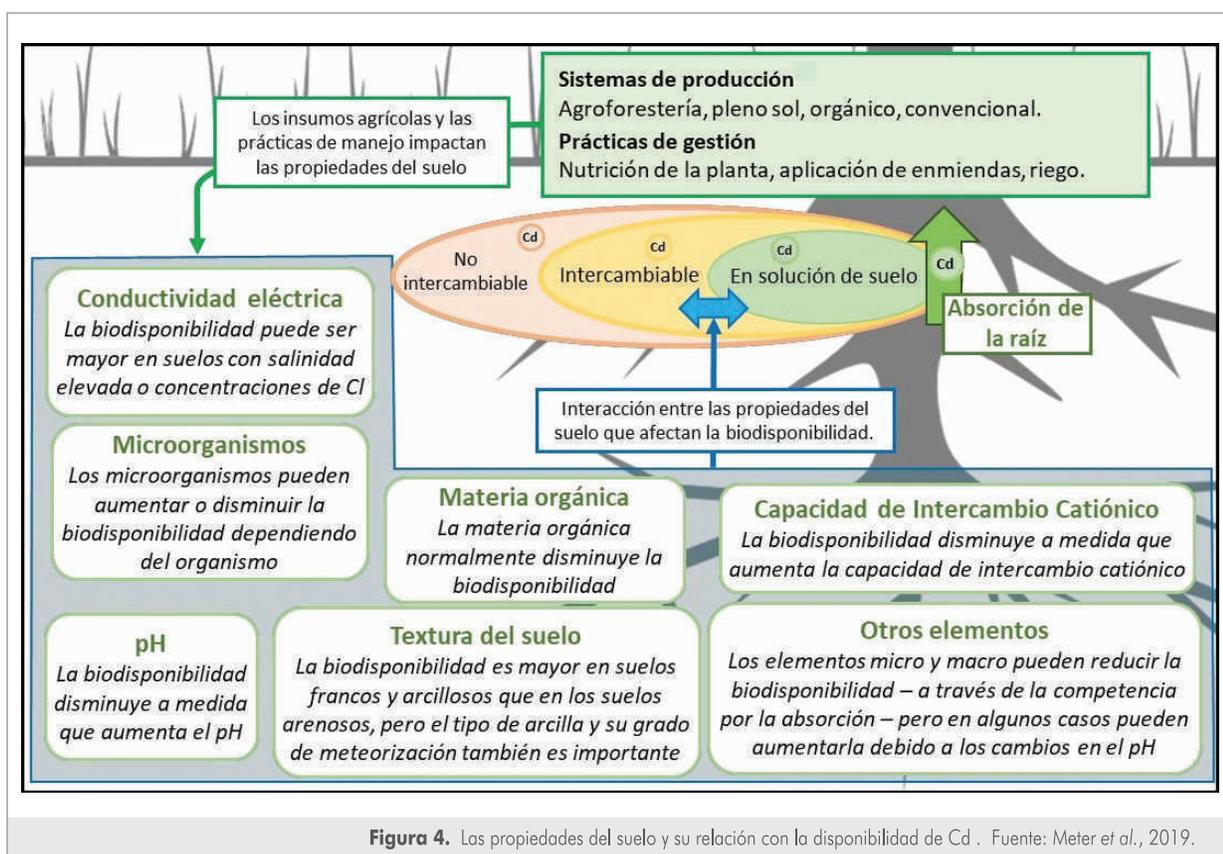


Figura 4. Las propiedades del suelo y su relación con la disponibilidad de Cd. Fuente: Meter et al., 2019.

AGRADECIMIENTOS

A los productores de cacao y a las asociaciones KATBALPOM, ASODIRP, ASOSELNOR, ADEMAYACH, APODIP y APRODERK que apoyaron con información sobre el manejo de sus plantaciones..

A los técnicos de campo y encargados de los centros de acopio que fueron un vínculo importante con líderes y productores que participaron en el estudio.

Al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) por el financiamiento de este estudio

a través del programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria (CRIA) (Contrato IICA-CRIA-044-2018), ejecutado a través del Convenio de Cooperación Técnica y Administrativa 11-2015 suscrito entre el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación –MAGA- y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura –IICA-.

Al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, por todo el apoyo, acompañamiento y seguimiento brindado durante la ejecución de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., Maurice, L., (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: a field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environ. Pollut.* 229, 950-963.
- Badillo Germán, J.F., (1985) Curso básico de toxicología ambiental. p. 205-29. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Metepec; ECO.
- Canchignia, F., Auhing, J., Cedeño, Á., Carrillo, M. & Bravo, D. (2021). Guía 12: Mitigación de cadmio por microorganismos. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador*. 1ra edición, pp. 1-32. Quito, Ecuador.
- Capó Martí M.A., (2007). Principios de ecotoxicología: diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente. Editorial Tebar. Madrid, España.
- CODEX (2020). Codex Alimentarius Commission. Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comité del CODEX sobre contaminantes de los alimentos. Anteproyecto de código de prácticas para la prevención y reducción de la contaminación por cadmio en los granos de cacao. Décima cuarta reunión Utrecht (Países Bajos).
- Comisión Europea. (2014). REGLAMENTO (UE) No 488/2014 DE LA COMISIÓN. *EFSA Journal*, 9(2), 10-14. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>
- Durango, W., Carrillo, M. & Peña, K. (2021). Guía 11: Mitigación de cadmio en el suelo mediante enmiendas orgánicas. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador*. 1ra edición, pp. 1-30. Quito, Ecuador.
- González Martínez, W.H. (2013). Aspectos generales sobre la génesis y evolución de los suelos de la república de Guatemala. En Memoria Presentación de resultados de investigación. Zafra 2012-2013. CENGICANA. Guatemala pp. 359-372.
- Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Chincheros Paniagua, J., Armengot, L., Schneider, M., Schulin, R., (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Sci. Total Environ.* 580, 677-686.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V. y Schulin R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of the total environment*, 612, (2018), 370 - 378.
- He, S., He, Z., Yang, X., Stoffella, P.J., Baligar, V.C., (2015). Soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. vol. 134. Elsevier Inc., pp. 135-225. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.005>.
- International Zinc Association (IZA), & Asociación Latinoamericana del Zinc (LATIZA). (2008). *Zinc en los fertilizantes. La contribución a la solución de un problema nutricional mundial*. *Revista Fertilizar*, 21, 25-32.
- Lindsay, W.L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. Wiley - Interscience. New York, USA.
- López Ulloa, M., Jaimez, R. y Orozco Aguilar, L. (2021). Cadmio en el cultivo de cacao: Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador. 1ra edición, pp 1-20. Quito, Ecuador.
- Meter A., Atkinson R.J. y Laliberte B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe-Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Bioersity International*, Roma.

- McLaughlin, M.J., Singh, B.R. (1999). Cadmium in Soils and Plants. In: McLaughlin, M.J., Singh, B.R. (eds) Cadmium in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 85. Springer, Dordrecht, Países Bajos.
- MOCCA. (2020). Boletín informativo de cadmio. Publicación # 4. Foro virtual: América Latina y el Caribe.
- Oc Llatance, W., Gonza Saavedra, C.J., Guzmán Castillo, W. y Pariente Mondragón, E. (2018). Bioacumulación de cadmio en el cacao (*Theobroma cacao*) en la comunidad nativa de Pakun, Perú. *Revista Forestal del Perú*, 33 (1): 63-75.
- OMC. (2021). *Preocupaciones comerciales específicas - Sistema de Gestión de la Información Sanitaria y Fitosanitaria*. <http://spsims.wto.org/es/SpecificTradeConcerns/View?lmsId=503>
- Patiño Torres, C. (s.f). Diagnóstico preliminar de niveles de cadmio en algunos suelos cacaoteros de Colombia y Perú, y estudios de experiencias exitosas de manejo. Universidad del Tolima. Colombia.
- Peña, K., Carrillo, M., Durango, W., Orozco, P. & Peña, A. (2021). Guía 13: Mitigación de cadmio por fitorremediación. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1.º ed., pp. 1-26). Quito, Ecuador.
- Regoli, L. (2005). Contaminación transfronteriza del aire de larga distancia por metales pesados. Presentación para la LR/UNECE-LRTP heavy metals. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa. Berlín, Alemania.
- Rodríguez Serrano, M., Martínez de la Casa, N., Romero Puertas, M., del Río, L. A., & Sandalio, L. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*, 17(3), 139-146. <https://doi.org/10.7818/re.2014.17-3.00>
- Sandoval-Pineda, J. F., Pérez-Moncada, U. A., Rodríguez, A., & Torres-Rojas, E. (2020). Alta presencia de cadmio resulta en baja diversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Biologica Colombiana*, 25(3), 333-344.
- Smolders, E., Mertens, J., (2013). Cadmium. In: Alloway, B.J. (Ed.), *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. Springer Science+Business Media, pp. 283-311 https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_10.
- Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulín, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment*, 781, 1-19.
- Yanus, R.L., Sela, H., Borojovich, E.J.C., Zakon, Y., Saphier, M., Nikolski, A., Gufflais, E., Lorber, A., Karpas, Z. (2014). Trace elements in cocoa solids and chocolate: an ICPMS study. *Talanta* 119, 1-4.