

**FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODISPONIBILIDAD  
DE CADMIO EN SUELO Y SU ACUMULACIÓN POR LA PLANTA**



**“CAJA DE HERRAMIENTAS PARA LA PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DE LA  
CONTAMINACIÓN DE CADMIO EN LA CADENA DE CACAO-ECUADOR”**



sembramos  
*Futuro*

*Lenín*



# GUÍA 3

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIODISPONIBILIDAD DE CADMIO EN SUELO Y SU ACUMULACIÓN POR LA PLANTA

Dirigida a: investigadores, asesores y técnicos agrícolas.

### AUTORES

Laudine Marchive<sup>1</sup>; Magdalena López-Ulloa<sup>2</sup>; Eduardo Chávez<sup>3</sup>;  
Rachel Atkinson<sup>4</sup>

### REVISIÓN PARES EXTERNOS

Ramón Jaimez<sup>5</sup>; Fiorella Barraza<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Geosciences Environnement Toulouse (GET); Observatoire Midi-Pyrénées (OMP). 14 avenue Edouard Belin - 31400. Toulouse, France. laudinemarchive@gmail.com

<sup>2</sup> Cooperación Técnica Alemana, GIZ. Programas Cadenas de Valor. Consultora. Quito, Ecuador. maggielopez62@gmail.com

<sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Facultad de Ciencias de la Vida. Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador. fchavez@espol.edu.ec

<sup>4</sup> Biodiversity International y Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. ratkinson@cgiar.org

<sup>5</sup> Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ingeniería Agronómica. Portoviejo, Ecuador. ramon.jaimez@utm.edu.ec

<sup>6</sup> University of Alberta. Department of Renewable Resources. Edmonton, Canada; Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). Tarapoto, Perú. barrazac@ualberta.ca ; fiorella.barraza@hotmail.com

### **Coordinación general**

República del Ecuador  
Ministerio de Agricultura y Ganadería  
Programa Nacional de Reactivación de Café y Cacao



### **Coordinación editorial**

Magdalena López, Consultor Programas Cadena de Valor, GIZ  
Pedro Ramírez, GIZ  
José Luis Cueva Cango, MOCCA-Rikolto

### **Revisores internos**

Andrés Proaño, MAG; Luis Herrera, MAG; Luis Orozco, MOCCA-LWR; Verónica Proaño, AVSF;  
Ana Gabriela Velasteguí, CESA; Natalia Palomino, MOCCA-Rikolto; Luis Gualotuña, MAG

### **Fotografías**

Pedro Ramírez, GIZ; Ana Gabriela Velasteguí, CESA; Roberto León, MAG

### **Corrección de estilo y diagramación editorial**

Carla Bohórquez; Ricardo Bravo; Martín Quirola

### **Cita del documento**

#### **Versión digital:**

Marchive, L., López-Ulloa, M., Chávez, E. & Atkinson, R. (2021). Guía 3: Factores que influyen en la biodisponibilidad de cadmio en suelo y su acumulación por la planta. *Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1.ª ed., pp. 1-24). Quito, Ecuador. [https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja%20de%20Herramientas\\_Cadmio\\_Cacao/](https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja%20de%20Herramientas_Cadmio_Cacao/)

“La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo financiero de la Unión Europea y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Su contenido es responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de los donantes”.

Copyright © 2021. Todos los derechos reservados. Este documento puede reproducirse para fines no comerciales citando la fuente.

ISBN: 978-9942-22-516-0





# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Definiciones</b>	<b>3</b>
<b>3. El cadmio en el suelo</b>	<b>4</b>
<b>4. Factores edáficos que influyen en la movilidad y biodisponibilidad del cadmio</b>	<b>8</b>
4.1 pH	9
4.2 Materia orgánica del suelo (MOS)	10
4.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	11
4.4 Nutrientes	11
4.5 Salinidad	14
4.6 Microbiología del suelo	14
<b>5. Otros factores que influyen sobre la absorción de cadmio en el cultivo de cacao</b>	<b>16</b>
5.1 Variedad de la planta	16
5.2 Manejo del cultivo de cacao	18
<b>6. Conclusión</b>	<b>19</b>
<b>7. Referencias</b>	<b>20</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Formas de metales traza en el suelo y su movilidad y biodisponibilidad relativa.</i>	5
<b>Tabla 2.</b> <i>Concentraciones de cadmio en hojas y almendras de varios grupos genéticos del banco de germoplasma del Cocoa Research Center de Trinidad y Tobago.</i>	17

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Compartimentos de cadmio en el suelo y los mecanismos de retención y liberación del cadmio (<math>Cd^{+2}</math>) en la solución del suelo.</i>	6
<b>Figura 2.</b> <i>Propiedades del suelo, sistemas de producción y manejo que afectan la disponibilidad de cadmio para las plantas de cacao.</i>	8

# 1. Introducción

Esta guía introduce a investigadores, asesores, técnicos agrícolas y agricultores<sup>1</sup> sobre las distintas formas en como se presenta el cadmio (Cd) en el suelo y en sus diferentes compartimientos. A su vez, se explica cómo las propiedades del suelo, características de la planta y manejo agronómico influyen en su movilidad y disponibilidad en la solución de suelo y en la biodisponibilidad para ser absorbido por el cultivo de cacao.

---

<sup>1</sup>Se recomienda a los agricultores leer las guías 1 y 2 previamente a la lectura de esta guía.



## 2. Definiciones

**Absorción:** transferencia de materia de una fase A (absorbato), a una fase B (absorbente). Ejemplo, el  $\text{Cd}^{+2}$  (absorbato) se transfiere a la planta de cacao o al interior de una arcilla (que actúan como absorbentes).

**Adsorción:** proceso por el cual un elemento soluble es retirado del agua mediante el contacto con una superficie sólida. Ejemplo: el cadmio soluble es retirado de la solución del suelo por el contacto con la fase sólida del suelo (mineral y orgánica).

**Antagonismo:** cuando el aumento de la concentración de un **ion A** detiene la absorción de un **ion B**. Su efecto llega a ser máximo cuando el **ion A** supera la concentración del **ion B** deteniendo en su totalidad la absorción. Esto ocurre por las interacciones entre iones con propiedades fisicoquímicas similares, como es la valencia y/o el diámetro del ion.

**Biodisponible:** es la especie química del elemento disponible presente en el suelo, que la planta de cacao puede absorber. Para simplificar el lenguaje, en esta guía utilizaremos biodisponibilidad como sinónimo de fitodisponibilidad (biodisponibilidad para las plantas específicamente).

**Desorción:** proceso inverso a la adsorción; es decir, es la liberación del elemento soluble retenido en una superficie sólida.

**Especiación química:** se refiere a la diferenciación entre las distintas especies químicas en las que puede encontrarse un elemento.

**Factor de bioconcentración:** es el cociente (o fracción) de la concentración del elemento considerado en la planta (hojas, tallos, granos, frutos y raíces) sobre su concentración total en el suelo.

**Sinergismo:** se puede definir como la relación positiva que produce un **ion A** sobre la absorción de otro **ion B**, incrementando la absorción del **ion B** en la planta. Esto ocurre generalmente entre iones que tienen diferente valencia.



### 3. El cadmio en el suelo

El cadmio es un elemento natural que existe en el suelo en concentraciones pequeñas (trazas). Sin embargo, factores endógenos o exógenos pueden contribuir a un enriquecimiento de estas trazas y convertirlas en contaminantes del suelo; por ejemplo, trazas superiores a  $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$ . El cadmio puede existir bajo diferentes formas químicas en el suelo, pero la más problemática es como catión divalente ( $\text{Cd}^{2+}$ ). El principal reservorio de cadmio es el suelo y según el tipo de suelo y propiedades fisicoquímicas, el elemento estará más o menos disponible para ser transportado a las plantas.

Según Blommaert (2019), la mayoría del cadmio se encuentra en la fase sólida del suelo (99%); es decir, asociado a los minerales y a la materia orgánica. Sin embargo, el 1% es parte de la fase líquida del suelo, que es el medio de conexión entre el suelo y la planta. Por esta razón, los planes de mitigación se enfocan en reducir la concentración de cadmio en esta fracción (acuosa) y así reducir su transferencia hacia la planta. En la fase líquida del suelo, casi el total de cadmio está bajo la forma  $\text{Cd}^{2+}$ , que puede ser directamente absorbido por la planta, mediante los canales iónicos situados en las membranas de las células radiculares. El 1% de la fase líquida forma complejos orgánicos, inorgánicos o ligada a coloides, favoreciendo a su vez la adsorción a la planta (Blommaert, 2019).

El cadmio en el suelo proviene de fuentes naturales y/o antropogénicas. El cadmio geodisponible viene de la roca madre tras ser liberado por meteorización mecánica, biológica y química o por deposición de partículas, producto de la actividad volcánica.



El cadmio presente en el suelo y sedimentos puede hallarse en cinco compartimentos (Figura 1):

- (1) Soluble en la solución del suelo ( $\text{Cd}^{2+}$  complejos solubles).
- (2) En la fase intercambiable o sitios de intercambio catiónico de arcillas.
- (3) Adsorbido en los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, sulfuros y fosfatos.
- (4) Complejos con la materia orgánica del suelo (absorbido).
- (5) Asociado a la roca madre<sup>2</sup> (partículas sólidas).

En la Tabla 1 se resume las formas en la que los metales traza como el cadmio están presentes en el suelo e indica la mayor o menor disponibilidad relativa, para ser absorbidos por las plantas.

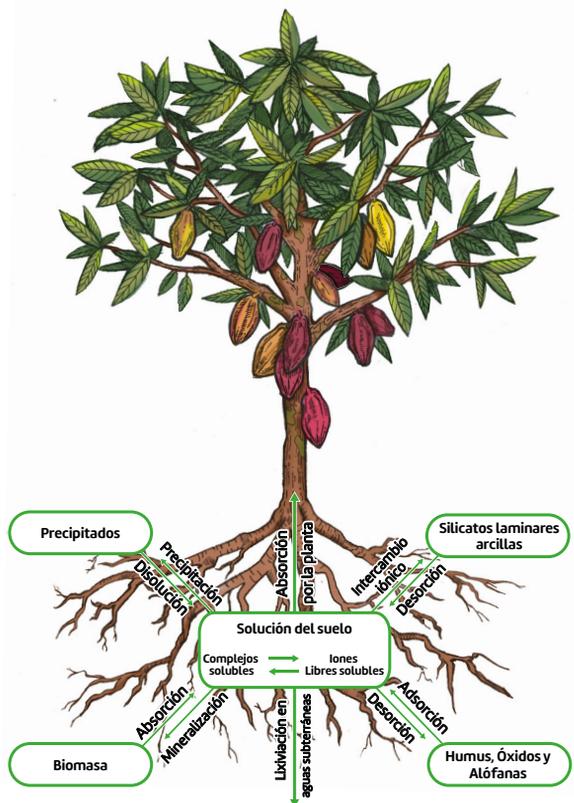
**Tabla 1.** Formas de metales traza en el suelo y su movilidad y biodisponibilidad relativa.

Formas químicas de cadmio en el suelo	Movilidad- biodisponibilidad relativa
Iones simples o complejos en solución	Fácil – alta
Cationes de cambio en complejo de intercambio orgánico e inorgánico	Media
Metales quelatados por compuestos orgánicos	Menos disponibles
Compuestos metálicos precipitados sobre partículas del suelo	Menos disponibles
Metales adsorbidos sobre partículas del suelo	Disponible cuando se disuelve el compuesto
Metales asociados o incorporados a una matriz biológica	Disponible después de la descomposición
Metal asociado o formando parte de la estructura de un mineral	Disponible cuando se meteoriza/ destruye el mineral

Fuente: Kabata-Pendias (1995).

<sup>2</sup>El término correcto es precipitado.

El cadmio retenido en el suelo puede pasar a la solución del suelo y aumentar su biodisponibilidad relativa mediante los siguientes procesos: a) liberación del cadmio retenido (intercambiable) por desorción de las capas de arcillas de filosilicatos (cationes de cambio); b) desorción del cadmio de los complejos humus-metal, óxidos y alófana; c) mineralización o descomposición de biomasa (matriz biológica) y d) disolución de los compuestos metálicos o precipitados formados (Figura 1). Por lo tanto, a mayor contenido de cadmio en el suelo en sus formas menos estables y más disponibles, se espera una mayor absorción por la planta de cacao.



**Figura 1.** Compartimentos del suelo donde se encuentran las formas químicas del cadmio y procesos de transferencia y especiación del cadmio disuelto ( $Cd^{2+}$ ) en el suelo.

Fuente: Modificado y traducido de Bolan et al. (2003).

El cadmio absorbido por las plantas es función de:

- a) La forma química y física en la que se encuentre el metal en el suelo.
- b) La capacidad de la planta para adsorberlo o absorberlo.

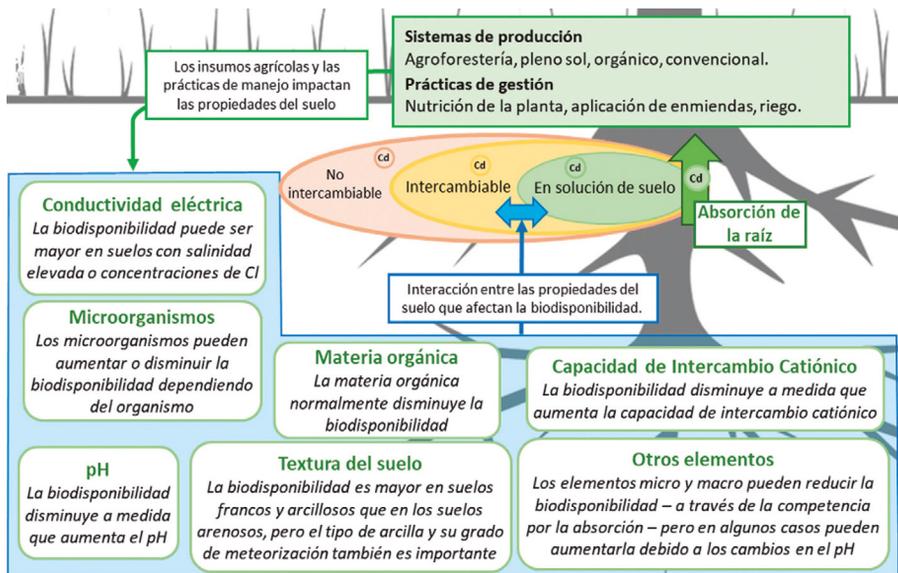
En los suelos, la biodisponibilidad de los metales está controlada por varios factores, principalmente por: la concentración total del metal, pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y contenidos y tipos de arcilla en el suelo (Alloway, 2013). Entre las propiedades del suelo, el pH es considerado como el factor más influyente en la movilidad y disponibilidad de cadmio en el suelo, debido a que el equilibrio de los procesos de adsorción-desorción y precipitación-disolución de muchos metales pesados son sensibles al pH.

El grado de absorción de los elementos traza por las plantas se puede calcular con el factor de bioconcentración (BCF), que para las almendras (o granos) de cacao presentó un valor promedio de 1,62 y para las hojas de 4,44 (Argüello et al., 2019), y un valor de hasta 12,5 veces más cadmio en almendras de cacao que en los suelos correspondientes. Estudios similares conducidos por Gramlich et al. (2018) mostraron que este factor pudo elevarse hasta, 46 veces más cadmio en la almendra que en el suelo.



## 4. Factores edáficos que influyen en la movilidad y biodisponibilidad del cadmio

El objetivo de esta sección es revisar los factores edáficos que influyen en la movilidad y biodisponibilidad del cadmio en el suelo. Como se observa en la Figura 2, los sistemas de producción de cacao y las prácticas agrícolas pueden influenciar e impactar en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, y por lo tanto, en la mayor o menor movilidad y biodisponibilidad del cadmio para ser absorbido por la planta.



**Figura 2.** Propiedades del suelo, sistemas de producción y manejo del cultivo que afectan la disponibilidad de cadmio para las plantas de cacao.  
Fuente: Meter et al. (2019).

## 4.1 pH

Sin duda la propiedad del suelo más influyente en la biodisponibilidad de cadmio es el pH. El cadmio está más disponible a pH ácidos ( $< 6$ ), porque disminuye la adsorción a partículas de suelo, lo que incrementa la solubilidad y la absorción por parte de las raíces de las plantas (Kabata-Pendias & Szteke, 2015). Por consiguiente, al incrementar el pH en suelos ácidos supone una menor biodisponibilidad de cadmio (Shahid et al., 2016), aunque esto puede ser eventualmente contrarrestado por la salinidad, por la formación de sales de cloruro y sulfato de cadmio que son fácilmente solubles (Eisler, 1985).

En suelos neutros y ligeramente alcalinos (pH 7,5 – 8,0) el cadmio es menos biodisponible, porque tiende a unirse fuertemente a las partículas del suelo o precipitarse como carbonatos e hidróxidos. Sin embargo, en medios muy alcalinos los hidróxidos pueden pasar de nuevo a la solución como hidroxicomplejos.

Algunos estudios muestran contradicciones al respecto de la influencia del pH sobre la absorción del cadmio por la planta. Esto ocurre porque en estudios a gran escala no solamente se tienen suelos ácidos, sino un rango muy grande de pH; donde no solo el factor pH influye, sino también otros factores pueden incidir, como la concentración del cadmio total en el suelo. Así, Argüello et al. (2019), al considerar los contenidos de cadmio total en el suelo, observaron que el pH influyó significativamente en la transferencia de cadmio del suelo sobre los niveles de cadmio en almendras de cacao (ver ejemplo Guía 6, Pág. 12). Al contrario, Lewis et al. (2021) hallaron una correlación significativa y negativa entre contenidos de cadmio en hojas de cacao y el pH de suelos en Trinidad y Tobago.





## 4.2 Materia orgánica del suelo (MOS)

La MOS tiene un papel importante en la biodisponibilidad del cadmio, debido a la alta CIC que posee y que puede incrementar la capacidad de adsorber cationes como el  $\text{Cd}^{2+}$ . La MOS contiene ácidos húmicos o fúlvicos que presentan grupos funcionales ( $\text{OH}$ ,  $\text{COOH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{CONH}_2$ ,  $\text{CO}$ , quinonas, etc.), que forman complejos de intercambio (adsorción) o quelatos (absorción); de esta forma el metal puede quedar fuertemente retenido, inmovilizado o no disponible para las plantas (Bravo et al., 2014; Blommaert, 2019).

Los residuos orgánicos y las fracciones lábiles de la MOS son fuente de carbono (energía) para los microorganismos edáficos, que pueden incrementar su población y actividad enzimática. En estos procesos el cadmio se puede precipitar o ser acomplejado, favoreciendo en algunos casos su adsorción en el suelo (He et al., 2005).

La disponibilidad del cadmio está asociada a la formación de complejos solubles cadmio – sustancias húmicas, que pueden migrar fácilmente a las capas profundas o mantenerse en la solución del suelo como complejos orgánicos (Khan et al., 2017).

El mantener contenidos altos de MOS (por ejemplo, mediante aplicación de enmiendas edáficas) y pH neutros a alcalinos, permitirá que la biodisponibilidad relativa de cadmio en el suelo disminuya, al incrementarse los sitios de contacto y la formación de complejos estables (Khan et al., 2017).

### 4.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico es la capacidad que tiene un suelo de retener y/o intercambiar cationes. Por lo tanto, los suelos que presentan mayor CIC tienen mayor potencialidad de fijar cadmio en los sitios de intercambio en las arcillas y materia orgánica (Cargua et al., 2010).

El poder de intercambiar cationes depende de los contenidos de la MOS, cantidad y tipo de arcillas, óxidos e hidróxidos metálicos, valencia y radio iónico hidratado del metal y de la interacción del cadmio con otros cationes en la solución del suelo.

El pH tiene gran influencia en la carga neta de los suelos, especialmente de la MOS, arcillas y óxidos e hidróxidos metálicos, por lo tanto en los procesos de adsorción y desorción del cadmio. De acuerdo a Galán (2000), el área de superficie de los óxidos de hierro y manganeso que recubren las arcillas, ocasionan una alta adsorción de cadmio.

### 4.4 Nutrientes

La transferencia del  $Cd^{2+}$  del suelo a la planta se realiza a través de los transportadores de cationes situados en las membranas de las células radiculares. En este sentido, las concentraciones en nutrientes catiónicos (macro y micro nutrientes) disponibles en el suelo tienen un impacto sobre la absorción de cadmio por las raíces de las plantas. Porque el  $Cd^{2+}$  al presentar similares propiedades fisicoquímicas a los cationes divalentes  $Zn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Fe^{2+}$ , puede competir con estos por las mismas membranas de transporte de la raíz (Pereira et al., 2017; Castro et al., 2015; Gramlich et al., 2018).

Huamani et al. (2012) encontraron una correlación significativa y negativa entre el contenido de cadmio en suelos cacaoteros del Perú y el contenido de calcio y magnesio en hojas de cacao, probablemente explicada por una competencia frente a los transportadores celulares de las raíces del cacao. Estos resultados resaltan la importancia de los análisis de suelos, hojas y

granos, para detectar posibles deficiencias o excesos de elementos clave y por consiguiente prevenir la contaminación por cadmio y específicamente por la fracción de cadmio resultante de la descomposición de las hojas en el suelo.

Los estudios de las interacciones entre cadmio y nutrientes se han enfocado a la relación Cd/Zn por su mayor similitud química. De acuerdo a Kabata-Pendias (2011), las interacciones de zinc y cadmio son controversiales porque presentan efectos de sinergismo y de antagonismo en aplicaciones en cultivos de cacao, mientras que Souza dos Santos et al. (2020) en su estudio del efecto del aporte de Zn en suelos cacaoteros de Brasil, indicaron que la aplicación de Zn disminuyó la absorción del cadmio en plántulas de cacao CCN-51 y en la translocación de cadmio de las raíces a las hojas.

Barraza et al. (2021) reportaron varias correlaciones entre diferentes nutrientes y variedades de cacao. En la variedad CCN-51, la concentración de cadmio en las hojas se correlaciona positivamente con el Ni y el Zn en





hojas. Por otro lado, en la variedad Nacional, la concentración de cadmio en los granos presenta una correlación positiva con el Ni en granos. Los nutrientes del suelo no solo afectan la absorción del cadmio por la planta, sino también su movilidad al interior de la planta. De acuerdo con Qin et al. (2020), el boro (B) puede contribuir a la reducción de la absorción de cadmio a nivel de la raíz en el cultivo de maíz. Elementos como el manganeso (Mn) y el selenio (Se) son importantes para la defensa de la planta de cacao frente a la toxicidad del cadmio (Oliveira et al., 2020).

Los macro y micronutrientes pueden incrementar (deficiencia de macro y/o micronutrientes) o reducir (concentración adecuada de macro y/o micronutrientes) la absorción de cadmio por la planta de cacao. Además, una buena nutrición del cultivo podría aumentar la productividad lo que ocasionaría un efecto de dilución en la concentración de cadmio en las almendras.



## 4.5 Salinidad

Naturalmente el cadmio se presenta como un metal divalente que es insoluble en agua, pero si está en forma de sales como cloruro y sulfato el cadmio se vuelve fácilmente soluble (Eisler, 1985).

Se ha demostrado que la salinidad y la presencia del cloruro ( $\text{Cl}^{-1}$ ) aumenta la biodisponibilidad del cadmio por encima de aproximadamente  $500 \text{ mg kg}^{-1}$  de cloro en el suelo (McLaughlin et al., 1994a). Esta concentración corresponde a una conductividad eléctrica (relación suelo agua 1:5) de aproximadamente  $350 \mu\text{S cm}^{-1}$ ; este nivel en general corresponde a suelos ubicados cerca de las zonas costeras o en zonas salinas.

## 4.6 Microbiología del suelo

El suelo contiene microorganismos como bacterias, levaduras y hongos que pueden ser capaces de metabolizar el cadmio, lo que conlleva al secuestro de este elemento o por lo contrario pueden liberar el cadmio retenido en la solución del suelo, afectando su movilidad en el suelo y absorción por la planta. Los estudios realizados presentan resultados positivos y negativos sobre el efecto de los microorganismos del suelo en la absorción de cadmio por las plantas. Esto puede deberse a la variedad de organismos y sus interacciones en los suelos. Por ejemplo, estudios realizados con micorrizas presentan resultados contradictorios. Así, Jiang et al., (2016) observaron que las plantas inoculadas con micorrizas absorbían menos cadmio que las plantas sin micorrizas. Mientras, que Ramtahal et al. (2012) encontraron que las micorrizas no presentaron respuesta positiva a la inmovilización del cadmio en cacao. En la Guía 12 se presentan los mecanismos de inmovilización de cadmio por bacterias.



## 5. Otros factores que influyen sobre la absorción de cadmio en el cultivo de cacao

### 5.1 Variedad de la planta

La contaminación con cadmio de los granos de cacao también se da en función de la variedad de cacao. Según diferentes autores (Arévalo-Gardini et al., 2017; Lewis et al., 2018) la variedad de cacao influye significativamente en la absorción de cadmio. Esto se ha observado en estudios de invernadero (bajo condiciones controladas) y campo donde hay una gran variación en el contenido de cadmio en las hojas y los granos. Trabajos realizados por FHIA (2019) en Honduras determinaron que las variedades Caucazia-37, Caucazia-47, Pound-7 y Pound-12, presentan baja capacidad para absorber y transportar cadmio desde el suelo hasta los granos de cacao, por lo tanto, estas pueden utilizarse como portainjertos para reducir la absorción de cadmio.

Chávez y colaboradores (datos no publicados) realizaron un estudio hidropónico con 8 cultivares de Ecuador. Según los resultados obtenidos, la influencia genética en la absorción de cadmio difiere en un factor de 4. Esto quiere decir que la capacidad de la variedad con mayor acumulación fue cuatro veces mayor que la de menor absorción. Si este factor se mantiene en campo, existiría gran potencial para poder reducir la concentración de cadmio por el uso de variedades con capacidad de excluir cadmio.

Lewis et al. (2018) evaluaron los niveles de cadmio en hojas y almendras de 100 accesiones de diferentes grupos genéticos y poblaciones híbridas

de *Theobroma cacao* L; al igual que el estudio anterior, estos autores encontraron una diferencia de 4:1 en la absorción de cadmio entre los grupos (Tabla 2). Cabe mencionar que este estudio fue realizado en campo con variedades propagadas por enraizamiento y sin injertar, por lo que la influencia del patrón se excluye y el efecto de baja/alta absorción es atribuible exclusivamente a la variedad.

El trabajo genético debe continuarse ya que las variedades deben ser probadas en condiciones variables de campo, para que las recomendaciones sean ajustadas a las diferentes realidades de las zonas productivas.

**Tabla 2.** Concentraciones de cadmio en hojas y almendras de varios grupos genéticos del banco de germoplasma del Cocoa Research Center de Trinidad y Tobago.

Hojas			Almendras		
Grupo genético	Promedio (mg kg <sup>-1</sup> )	Desviación estándar (mg kg <sup>-1</sup> )	Grupo genético	Promedio (mg kg <sup>-1</sup> )	Desviación estándar (mg kg <sup>-1</sup> )
Amelonado (N=4)	2,2	0,49	Amelonado (N=4)	0,95	0,243
Cantamana (N=7)	2,21	0,262	Cantamana (N=7)	1,86	0,14
Curaray (N=4)	2,3	0,33	Curaray (N=2)	0,55	0,188
Iquitos (N=11)	2,12	0,182	Iquitos (N=10)	1,27	0,105
Marañón (N=11)	2,04	0,185	Marañón (N=11)	1,03	0,09
Nacional (N=6)	2,32	0,262	(N=4)	0,78	0,188
Nanay (N=4)	2,24	0,185	Nanay (N=4)	1,05	0,097
Refractario (N=38)	2,33	0,126	Refractario (N=38)	0,86	0,063
Trinitario (N=6)	1,37	0,219	Trinitario (N=6)	0,66	0,109

Fuente: Lewis et al. (2018).

También es necesario evaluar la interacción entre el patrón e injerto en la absorción de cadmio, ya que es el injerto la forma tradicional de propagación de cacao.

De igual manera, Barraza et al. (2017) encontraron mayores niveles medios de cadmio en las almendras, hojas y mazorcas de cacao para la variedad CCN-51 (2,17; 2,38 y 2,14 respectivamente) comparado con el cacao nacional (1,26; 2,12 y 0,99) en Ecuador. Estas diferencias se observan también en la composición isotópica del cadmio, la cual sugiere que ambas variedades tendrían mecanismos diferentes de translocación (transporte desde la raíz hacia el resto de la planta) y secuestro (acumulación en ciertos órganos) de cadmio en hojas, cáscaras y granos de cacao.

Moore et al. (2020), observaron diferencias en el proceso de acumulación de cadmio entre los diferentes cultivares de cacao estudiado; explicaron estas diferencias por la expresión de proteínas específicas implicadas en el transporte de cadmio en ciertos cultivares de cacao.

## 5.2 Manejo del cultivo de cacao

Varios estudios de mitigación de cadmio en cacao sugieren el manejo adecuado de la fertilidad del suelo como medida complementaria. De esta manera se busca incrementar o mantener la productividad y disminuir los riesgos de absorción del cadmio, manteniendo niveles adecuados de los nutrientes como el Zn, Mn, Ca, Mg, Fe, que al presentar deficiencias (bajos contenidos) en el suelo hay menor competencia por los sitios de absorción debido a que a menor cantidad de nutrientes disminuye la competencia al nivel de la raíz.

Los fertilizantes o enmiendas no deben contener cadmio y se debe evitar el uso de productos que disminuyan el pH o que tengan aniones que faciliten la solubilidad del cadmio. El buen manejo nutricional del suelo incrementa la productividad, lo que a su vez puede provocar un efecto de dilución del cadmio en la almendra de cacao que se cosecha.

## 6. Conclusión

El estudio de los factores que influyen sobre la biodisponibilidad del cadmio para las plantas y su acumulación resaltan la complejidad de la dinámica del cadmio en el sistema suelo-planta, la cual está gobernada por una gran cantidad de factores que pueden interactuar entre ellos. Existen pocos estudios en fincas cacaoteras hoy en día, la mayoría de estudios se realizan en condiciones controladas. Por lo tanto, los conocimientos disponibles siguen siendo mayormente localizados y simplificaciones que necesitan mayor profundización con más estudios de campo que incluyan la variabilidad de suelos y condiciones de manejo del cacao. Sin embargo, se pudieron identificar ciertos factores constantes mencionados en la literatura como:

- a) La cantidad de cadmio en el suelo.
- b) El pH del suelo.
- c) Los niveles de materia orgánica en suelos ácidos.
- d) El genotipo del cacao (existe mucha variabilidad entre genotipos, pero también depende del sitio de siembra).

Aunque los relativamente bajos niveles de cadmio en los suelos y la alta afinidad del cacao por este metal, dificulten la formulación de soluciones agronómicas generalizadas para reducir la concentración de cadmio en granos de cacao, de inmediato se recomienda trabajar con los factores mencionados anteriormente para la mitigación de cadmio en el cultivo de cacao.

## 7. Referencias

- Alloway, B.J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In: Alloway, Brian J. (Ed.). *Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*. Springer Netherlands. Dordrecht, pp 11–50.
- Arévalo–Gardini, E., Arévalo–Hernández, C.O., Baligar, V.C., He, Z.L. (2017). Heavy metal accumulation in leaves and beans of cacao (*Theobroma cacao* L.) in major cacao growing regions in Peru. *Science of The Total Environment*. 605–606, 792–800.
- Argüello, D., Chávez, E., Lauryssen, 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.
- Barraza, F., Schreck, E., Lévêque, T., Uzu, G., López, F., Ruales, J., Maurice, L. (2017). Cadmium bioaccumulation and gastric bioaccessibility in cacao: A field study in areas impacted by oil activities in Ecuador. *Environmental Pollution*, 229, 950–963.
- Barraza, F., Moore, R., Rehkämper, M., Schreck, E., Lefeuvre, G., Kreissig, K., Coles, B., Maurice, L. (2019). Cadmium isotope fractionation in soil – cacao systems of Ecuador: a field study. *RSC Advances* 9, 34011–34022. <https://doi.org/10.1039/C9RA05516A>
- Barraza, F., Schreck, E., Uzu, G., Lévêque, T., Zouiten, C., Boidot, M., Maurice, L. (2021). Beyond cadmium accumulation: distribution of other trace elements in soils and cacao beans in Ecuador. *Environmental Research* 110241. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110241>
- Blommaert (2019). The uptake of cadmium by cocoa seedlings as affected by root distribution and bioavailable cadmium (Tesis).

- Bolan, N.S., Adriano, D.C., Mani, P.A., Duraisamy, A. (2003b). Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. II. Effect of lime addition. *Plant and Soil* 251, 187–198.
- Bravo, I., Arboleda, C., & Martin, F. (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):1–14.
- Cargua, J., Mite, F., Carrillo, M. y Durango W. (2010). Determinación de las formas de Cu, Cd, Ni, Pb, y Zn y su biodisponibilidad en suelos agrícolas del litoral ecuatoriano. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Santo Domingo, 17–19 de noviembre 2010.
- Castro, A. V, de Almeida, A.–A. F., Pirovani, C. P., Reis, G. S. M., Almeida, N. M., & Mangabeira, P. A. O. (2015). Morphological, biochemical, molecular and ultrastructural changes induced by Cd toxicity in seedlings of *Theobroma cacao* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 115, 174–186.
- Eisler, R. (1985). Cadmium Hazards to Fish, Wildlife, and Invertebrates: a Synoptic Review. U. S. Dep. Int. Biological Report 85 (1.2), Contaminant Hazard Reviews Report 2.
- FHIA, Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (2019). Cadmium accumulation and allocation in different cacao cultivars. *Science of The Total Environment*. Volume 678, Pages 660–670.
- Galán, E. (2000). The role of clay minerals in removing and immobilizing heavy metals from contaminated soils. In “Proceedings of the 1st Latin American Clay Conference”, Vol 1, C. Gomes, ed. Funchal, 351–361.
- Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., Gonzalez, V., & Schulín, R. (2018). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *Science of The Total Environment*, 612, 370–378.
- He, Z.L., Yang, X.E., Stoffella, P.J. (2005). Trace elements in agroecosystems

and impacts on the environment. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 19 (2), 125–140.

- Huamaní-Yupanqui H., Huauya M. Mansilla–Minayan L., Florida N., Ne-  
ria-Trujillo G. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de  
cacao (*Theobroma cacao*) orgánico. *Acta Agronómica* 61:339–344.
- Jiang Q-Y., Zhuo F., Long S-H., Zhao H-D., Yang D-Y., Ye Z-H., Li S-S., Jing  
Y-X. (2016). Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and  
alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cadmio-added  
soils?. *Scientific Reports*. 6, 21805. <https://doi.org/10.1038/srep21805>
- Kabata–Pendias, A. (1995). Agricultural problems related to excessive trace  
metal contents of soils. In “Heavy Metals”, W.Salomons, U. Förstner  
& P. Mader.eds.Springer–Verlag. Berlin, 3–18.
- Kabata–Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. CRC  
Press, Boca Raton, FL.
- Kabata–Pendias, B. Szteke. 2015. *Trace Elements in Abiotic and Biotic Envi-  
ronments*. CRC Press, Florida.
- Khan, M.A., Khan, S., Khan A., Alam, M. (2017). Soil contamination with cad-  
mium, consequences and remediation using organic amendments.  
*Science of the Total Environment*. Pp. 601–602 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030> 0048–9697
- Khan, M. A., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with  
cadmium, consequences and remediation using organic amend-  
ments. *Science of The Total Environment*, 601–602, 1591–1605.
- Lettens, S., Vandecasteele, B., Vos, B. De, Vansteenkiste, D., & Verschelde,  
P. (2011). Intra- and inter-annual variation of Cd, Zn, Mn and Cu in  
foliage of poplars on contaminated soil. *Science of The Total Envi-  
ronment*, 409(11), 2306–2316.
- Lewis, C., Lennon, A.M., Eudoxie, G., Umaharan, P. (2018). Genetic variation

in bioaccumulation and partitioning of cadmium in *Theobroma cacao* L. *Science of. Total Environment* 640–641, 696–703.

Lewis C., Lennon A.M., Eudoxie G., Sivapatham P., Umaharan G. (2021). Plant metal concentrations in *Theobroma cacao* as affected by soil metal availability in different soil types. *Chemosphere*. 262. wis.

McLaughlin, M. and Singh, B.R. (1999). *Cadmium in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences*. Editors. Springer Science+Business Media, B.V. 1st Edition 1999.

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*. Bioersivity International, Roma.

Moore, R.E.T., Ullah, I., de Oliveira, V.H., Hammond, S.J., Strekopytov, S., Tibbett, M., Dunwell, J.M. Rehkämper, M. (2020). Cadmium isotope fractionation reveals genetic variation in Cd uptake and translocation by *Theobroma cacao* and role of natural resistance-associated macrophage protein 5 and heavy metal ATPase-family transporters. *Horticulture Research*. Vol.7. No. 7.

Oliveira B.R., Furtado de Almeida A-A., Pirovani C. P., Barroso J. P., Neto C. H. de C., Santos N. A., Anherth D., Baligar V. C., Mangabeira P. A. O. (2020). Mitigation of Cd toxicity by Mn in young plants of cacao, evaluated by the proteomic profile of leaves and roots. *Ecotoxicology*. 29, 340–358. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02178-4>

Pereira de Araujo R., Furtado de Almeida A-A., Silva Pereira L., Mangabeira P.A.O., Olímpio Souza J., Pirovani C.P., Anherth D., Baligar V.C. (2017). Photosynthetic, antioxidative, molecular and ultrastructural responses of young cacao plants to Cd toxicity in the soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 144, 148–157. 10.1016/j.ecoenv.2017.06.006

Qin S., Liu H., Rengel Z., Gao W., Nie Z., Li C., Hou M., Cheng J., Zhao P. (2020). Boron inhibits cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by regu-

lating gene expression. *Plant Science*. 297. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110522>

Ramtahal, G., Chang Yen, I., Seegobin, D., Bekele, I., Bekele, F., Wilson, L., & Harrynanan, L. (2012). Investigation of the effects of mycorrhizal fungi on cadmium accumulation in cacao. *Proceedings of the Caribbean Food Crops Society*, 48, 147–152. Mexico.

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Niazi, N. K., & Antunes, P. M. C. (2016). Cadmium Bioavailability , Uptake , Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System, 241. <https://doi.org/10.1007/398>

Souza dos Santos M.L., Furtado de Almeida A-A., Martins da Silva N., Machado Oliveira B.R., Silva J.V.S., Souza Junior J.O., Ahnert D., Baligar V. (2020). Mitigation of Cd toxicity by zinc in juvenile cacao: Physiological, biochemical, molecular and micromorphological responses. *Environmental and Experimental botanic*. 179. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104201>



La "colección de guías sobre recomendaciones y buenas prácticas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio" es el resultado del esfuerzo de diferentes actores que, bajo la coordinación del Ministerio de Agricultura y Ganadería, han rescatado y sistematizado conocimientos y buenas prácticas, generadas por investigadores y técnicos nacionales e internacionales, útiles para prevenir y mitigar la contaminación por cadmio en la cadena del cacao. Las publicaciones que componen esta colección han sido elaboradas, publicadas y difundidas gracias al apoyo de las siguientes instituciones y organizaciones:



Proyecto  
**Cadenas de valor  
inclusivas y sostenibles**



Plataforma Multiagencia  
**Cacao 2030-2050**



@AgriculturaEc

AgriculturaEcuador

agricultura.ec

/AgriculturaEcuador

**Dirección:** Av. Eloy Alfaro N30-350 y Av. Amazonas

**Código postal:** 170516 / Quito-Ecuador. **Teléfono:** 593-2 396-0100

ISBN: 978-9942-22-516-0



9789942225160