



Técnicas para mitigar y reducir el cadmio en *Theobroma cacao* L.: Una revisión

Techniques to mitigate and reduce cadmium in *Theobroma cacao* L.: A review

Rocio Morejón-Lucio^{1*}; Mauricio Morejón-Centeno²

¹ Maestría en Agroindustrias con Mención Gestión de la Calidad y Seguridad Alimentaria, Escuela de Posgrado, Escuela Politécnica Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

² Maestría en Ciencias en Suelos, Facultad de Ciencias Agroambientales, Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, Puerto Rico.

ORCID de los autores:

R. Morejón-Lucio: <https://orcid.org/0000-0003-2629-7036>

M. Morejón-Centeno: <https://orcid.org/0000-0002-2621-2306>

RESUMEN

La exposición alimentaria al cadmio (Cd) es un problema de salud global. Actualmente la industria alimentaria da prioridad a la seguridad y calidad de los productos y la Unión Europea (UE) impulsó la nueva regulación con el Reglamento 844/2014 y recomienda un límite máximo de Cd de 0.8 mg kg⁻¹ para el chocolate con al menos el 50% de sólidos de cacao que entró en vigor a partir del 2019. Para abordar el problema del cadmio, se han desarrollado diferentes estrategias para mitigar el Cd en el suelo y reducir su concentración en las almendras de cacao en el proceso postcosecha. Esta revisión tiene como objetivo informar de las investigaciones y tecnologías, utilizadas en planes para reducir efectivamente el Cd en el cultivo de cacao y garantizar la calidad e inocuidad del chocolate. Se reporta la biorremediación con el uso de bacterias y hongos para inmovilizar o degradar el Cd en el suelo, la fitorremediación que involucra el uso de plantas para extraer o estabilizar el Cd en el suelo, las enmiendas del suelo orgánicas y biocarbón (biochar) que ayuda a reducir la disponibilidad del Cd. Finalmente se encontraron las técnicas de postcosecha que consisten en procesos como el escurrido del mucílago y la fermentación prolongada para reducir el contenido de Cd en las almendras de cacao.

Palabras clave: Cadmio; cacao; chocolate; biorremediación; técnicas postcosecha.

ABSTRACT

Dietary exposure to cadmium (Cd) is a global health problem. Currently, the food industry prioritizes product safety and quality, and the European Union (EU) promoted new regulation with Regulation 844/2014 and recommends a maximum Cd limit of 0.8 mg kg⁻¹ for chocolate with at least 50% cocoa solids that came into force as of 2019. To address the cadmium problem, different strategies have been developed to mitigate Cd in the soil and reduce its concentration in cocoa beans in the post-harvest process. This review aims to report on research and technologies used in plans to effectively reduce Cd in cocoa cultivation and ensure the quality and safety of chocolate. Bioremediation is reported with the use of bacteria and fungi to immobilize or degrade Cd in the soil, phytoremediation that involves the use of plants to extract or stabilize Cd in the soil, organic soil amendments and biochar that helps reduce the availability of Cd. Finally, post-harvest techniques were found that consist of processes such as mucilage draining and prolonged fermentation to reduce the Cd content in cocoa beans.

Keywords: Cadmium; cocoa; chocolate; bioremediation; post-harvest techniques.

1. Introducción

La presencia de cadmio en los alimentos representa un riesgo para la salud humana (Amjad et al., 2017). La acumulación de cadmio en el cuerpo humano por un tiempo prolongado puede llegar a dañar los riñones, el hígado y desmineralizar los huesos. Asimismo, puede causar defectos reproductivos y respiratorios (Barraza et al., 2017). De hecho, debido a su elevada toxicidad la Agencia Internacional de la Organización Mundial de la Salud ha clasificado al cadmio como un agente cancerígeno (Amjad et al., 2017). Asimismo, la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ha clasificado al cadmio como agente carcinógeno (Grupo I) para los seres humanos (Barraza et al., 2017; Jiménez, 2015).

La Comisión Técnica Científica de Contaminantes de la Cadena Alimentaria (CONTAM) de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) determinó que en varios países europeos existe una exposición alimentaria media al cadmio (Cd) que se acerca o incluso supera ligeramente la ingesta semanal tolerable de 2,5 µg/kg de peso corporal, por lo que la Comisión confirma, que es necesario reducir a exposición al cadmio en la población (Furcal-Beriguete & Torres-Morales, 2020). Es así que el 12 de mayo del 2014, se aprobó el Reglamento 488/2014, que entró en vigencia a partir de enero de 2019 y recomienda un contenido máximo de cadmio de 0,8 mg/kg para chocolate con un contenido igual o mayor al 50% de sólidos de cacao (COMISIÓN EUROPEA, 2014).

El cacao es uno de los principales productos de consumo a nivel mundial, debido a su gran valor nutricional. Además, el cacao constituye una de las principales fuentes de economía de África, Asia y América Latina. De hecho, alrededor del 70% de la producción mundial se concentra en África. Entre los principales productores de cacao del mundo se encuentran países como: Costa de Marfil, Ghana, Ecuador, Camerún y Nigeria (Cedeño & Dilas-Jiménez, 2022).

Entre los principales destinos de exportación del cacao ecuatoriano se ubican Asia, Oceanía y Europa con un 43,47%, 31,79% y 24,58% respectivamente. Actualmente Ecuador es el uno de los principales productores de cacao fino de aroma a nivel mundial, en el 2022 exportó 41.1496 Megagramos (Mg) de almendras de cacao, 2.980 Mg de licor, 4.875 Mg de manteca, 3.787 Mg de polvo de cacao y 2.288 Mg de chocolate. Por ende, la exportación fue de 90,66% de almendras

de cacao y el 9,34% de semielaborados (licor, manteca, chocolate, otros) (ANECACAO, 2024; Cedeño & Dilas-Jiménez, 2022).

El cacao fino de aroma representa entre el 6% y 8% de la producción mundial, de la cual un 80% se encuentra ubicada en América Latina (Cedeño & Dilas-Jiménez, 2022). El cultivo de cacao es una de las principales actividades de importancia económica que genera ingresos para muchas familias ecuatorianas. La producción de cacao del país se destinada principalmente a la exportación, en presentaciones de almendra seca, pasta, manteca y chocolate (ANECACAO, 2024).

Asimismo, la Comisión del Codex Alimentarius de la Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y Agricultura (por sus siglas en inglés FAO) /Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció los niveles máximos de cadmio para chocolates y derivados siguientes: 0,20 ppm, para chocolate con leche y contenido de materia seca total de cacao menor al 30%; 0,60 ppm para chocolate con contenido de materia seca total de cacao inferior al 50% y para chocolate con leche con un contenido de materia seca total de cacao igual o mayor al 30%; 1,5 ppm para cacao en polvo vendido al consumidor final o para ser empleado como ingrediente en la elaboración de cacao en polvo edulcorado que es vendido al consumidor final (chocolate para beber); 2,0 ppm para chocolate con contenido de materia seca total de cacao igual o superior a 50% (Santander et al., 2021).

Aunque se ha publicado una cantidad considerable de información sobre cadmio en cacao, aún existen muchos aspectos que no se comprenden completamente. Por lo tanto, es importante identificar las estrategias disponibles para implementar prácticas integrales que reduzcan tanto la absorción de cadmio por parte de las plantas de cacao, como el contenido de cadmio en las almendras de cacao.

Con este artículo se revisa el estado actual del conocimiento de la comunidad científica y técnica sobre la mitigación del cadmio del suelo y la reducción del cadmio en las almendras de cacao y los posibles beneficios enfocados a resolver los problemas de producción de cacao.

2. El cadmio y su biodisponibilidad

El cadmio (Cd) en las almendras de cacao proviene del suelo. De hecho, en todos los suelos del mundo hay presencia de Cd de forma natural, sin embargo, en algunos suelos hay mayor disponibilidad de Cd que en otros. Investigaciones

realizadas en Latinoamérica demuestran que el cadmio presente en los suelos son producto de la actividad volcánica, erosión de las rocas, sedimentos, vertederos entre otros (Vanderschueren & Pulleman, 2021). Hay que considerar, que la presencia de Cd en los suelos se ve influenciada por factores como el pH, potencial redox, contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, entre otros.

En ambientes ácidos el Cd es móvil, la concentración puede ser importante, debido a que este ión se absorbe débilmente en arcillas y otras partículas. Pero, en suelos con pH superior a 7 el Cd²⁺ precipita al reaccionar con los sulfuros, carbonatos o fosfatos. Asimismo, otras investigaciones afirman que cuando el pH es ácido los oxihidróxidos de hierro y la materia orgánica controlan la solubilidad del Cd. Mientras que, en pH alcalinos el Cd precipita y queda inmóvil, probablemente por la baja solubilidad de los carbonatos y fosfatos (Nieves et al., 2019). Asimismo, (Furcal-Beriguete & Torres-Morales, 2020) sostiene que en los suelos alcalinos el Cd es removido y absorbido por coloides, y esto disminuye la biodisponibilidad.

3. Cadmio en el cacao

El Cd ingresa por las raíces mediante el tejido cortical y las cargas negativas, formadas por el grupo carboxilo procedente del ácido péptico y las cargas positivas de los metales del suelo, este se une a la pared celular de las células epidérmicas y posteriormente por intercambio iónico es translocado a los demás tejidos de la planta de cacao (Furcal-Beriguete & Torres-Morales, 2020). Es decir que, el Cd puede desplazarse desde la raíz de la planta hasta el xilema mediante el apoplasto o el simplasto produciendo complejos. Las plantas de cacao por naturaleza captan el Cd de los suelos. Sin embargo, en plantaciones de cacao con altos contenido de Cd estas disminuyen la fotosíntesis, absorción de agua, absorción de nutrientes, por lo que llegan a presentar clorosis, inhibición del crecimiento, pardeamiento en las puntas de las raíces y posteriormente, la muerte (Dos Santos et al., 2020).

4. Cadmio en las almendras de cacao

El contenido de Cd en los tejidos de la planta puede llegar a ser superior al contenido del suelo. Algunos autores aseguran que, el fruto y las almendras de cacao presentan menor contenido de Cd que las hojas debido a que la planta

absorbe y moviliza altas concentraciones de cadmio disponibles en el suelo hacia la raíz, tallo y hojas (Furcal-Beriguete & Torres-Morales, 2020). La excesiva aplicación de fertilizantes y plaguicidas con alto contenido de zinc y calcio que liberan Cd, pueden constituir una fuente de Cd que contamina a la almendras de cacao (Reyes et al., 2020).

De acuerdo, a varios estudios y análisis realizados por la FAO y la OMS se estableció 0,2 mg/kg de Cd como límite máximo permisible para chocolate, almendras de cacao y otros cereales.

5. Técnicas de remediación en suelos contaminados con cadmio

5.1 Biorremediación

La biorremediación es una tecnología de control de contaminación, mediante organismos vivos como plantas, hongos, bacterias, entre otros. Estos organismos pueden degradar, transformar y remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos, inocuos o de menor toxicidad. Durante la biorremediación ocurren reacciones de óxido-reducción, procesos de absorción e intercambio iónico, inclusive reacciones de acomplejamiento y quelación a nivel molecular (Nieves et al., 2019).

Los microorganismos presentan amplias capacidades metabólicas para utilizar diferentes tipos de sustratos, y así obtener energía y en muchos casos transformarlos. El Cd es un metal pesado que actúa como sustrato y puede ser inmovilizado por microorganismos. De hecho, las bacterias y hongos tienen una alta capacidad de remoción de metales pesados e incluso superior a la de los métodos fisicoquímicos convencionales.

Ayubb et al. (2017) confirmaron que las bacterias aisladas *Burkholderia cepaceae* y *Pseudomonas fluorescens* pueden tolerar altas concentraciones de Cd y a la vez, promover el crecimiento vegetal en el cultivo de arroz. La biorremediación se realiza de forma natural sin el uso de sustancias tóxicas y es económica. Sin embargo, requiere un largo tiempo para observar sus resultados. Cabe destacar que, la biorremediación tiene mayor eficacia en suelos ácidos.

Pérez Moncada et al. (2019) sostienen que el uso de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) translocaron el Cd hacia la planta de cacao, no obstante, los árboles inoculados con HFMA-nativos redujeron significativamente el contenido de Cd en todos los órganos de la planta. Asimismo Sandoval-Pineda et al. (2020) ratifican, que las especies *Diversispora spurca*,

Rhizoglosum sp. y *Claroideoglosum etunicatum* en A-Cd son estrés-tolerantes y potencialmente aplicables como estrategias de mitigación en suelos altamente contaminados, sin embargo, existe una variabilidad en función de la especie de HFMA, contenido de Cd y propiedades físico-químicas del suelo.

Cayotopa-Torres et al. (2021) afirman que, existe una notable capacidad de remoción de Cd in vitro por las cepas *Trichoderma* spp. Los resultados demostraron que *T. brevicompactum* M43D remueve el (83,1%) de Cd, *T. harzianum* M1P el (67,0%) y *T. spirale* M55SM el (65,8%), estas cepas consiguen sobrevivir en máximas concentraciones de Cd (200 mg/l) y eliminan el Cd absorbido por las paredes celular del hongos durante el crecimiento. Las cepas de hongos *Glomus hoi*, *Glomus* sp., *Microkamienskia* sp., *Claroideolomus etunicatum* y *Microkamienskia peruviana* permitieron mayor reducción del Cd, tanto en el suelo como en los tallos, y a su vez, mostraron mayor incremento en altura y área foliar en las plantas de cacao (Vallejos-Torres et al., 2022).

Feria-Cáceres et al. (2022) concluyeron, que las cepas de bacterias nativas presentaron dos formas distintas de capturar el Cd, mediante la biosorción y por la precipitación del Cd en el citoplasma de la célula bacteriana (bioacumulación). También, destaca que la cepa nativa *Klebsiella* sp. (18-4B) creó cierto grado de inmovilización de Cd en el suelo. De modo que, las bacterias nativas evitan la acumulación de Cd en las raíces de las plantas de cacao, por lo que son una alternativa viable para la biorremediación de las plantaciones de cacao.

Ma et al. (2023) evaluaron cuatro cepas bacterianas (*Paenarthrobacter nitroguajacolicus* XF-5C, *Lysinibacillus fusiformis* L13, *Bacillus licheniformis* PB3 y *Methylobacterium brachiatum* B0021) y determinaron que tienen resistencia al Cd, reduciendo hasta un 58,82% del Cd en las plantas y un 10,68% de Cd disponible en el suelo. Por todo lo antes expuesto, la remediación microbiana es considerada una alternativa confiable para la biorremediación de suelos contaminados con Cd. Asimismo Córdoba-Novoa et al. (2023) determinaron, que las cepas *Burkholderia* spp., *Pseudomonas* spp., *Metarhizium* sp. GH24, *Annulohyphoxylon* sp. NH62 y *P. ignaria* YH5 presentaron alta capacidad de tolerancia y respuesta específica al Cd con una concentración mínima inhibitoria (MIC) de hasta 140 mg kg⁻¹ de Cd para bacterias y 2000 mg kg⁻¹ de Cd para hongos.

5.2 Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología sustentable basada en el uso de plantas bioextractoras de Cd para reducir los riesgos de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el suelo. Algunas especies vegetales tienen la capacidad de tolerar altas concentraciones de metales en sus tejidos. Las plantas realizan procesos bioquímicos que permiten la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los contaminantes (Núñez et al., 2004).

Ortiz-Cano et al. (2009) demostraron que la especie vegetal *Amaranthus hybridus* L. tiende a concentrar mayor contenido de Cd en sus tejidos a medida que incrementa la edad de la planta, esto puede asociarse a la formación de complejos bioquímicos durante el metabolismo del vegetal. Esta especie representa un potencial para la remediación de suelos con alto contenido de Cd. La planta *Eleusine indica* L. presenta mayor tolerancia al Cd y tiene capacidad de acumular Cd en sus raíces (Hamzah et al., 2016). También, se encontró que *Solanum nigrum* tiene potencial para reducir los niveles de Cd en plantaciones de cacao (Ramírez et al., 2018). Del mismo modo, *Pterocypsela laciniata* es un hiperacumulador y tolerante al Cd, de crecimiento rápido y alta capacidad de adaptación, sin embargo, dio excelentes resultados en las zonas subtropicales (Zhong et al., 2019). Esta especie, es capaz de tolerar y crecer en suelos con altas concentraciones de Cd e incluso el Cd en el suelo estimula la acumulación de biomasa de *S. nigrum*. De acuerdo a los resultados de Nieves et al. (2019) la Albahaca silvestre (*Galinsoga parviflora*) resultó una tecnología efectiva para suelos altamente contaminados con Cd, está debe aplicarse previo al desarrollo del cultivos y considerando la incidencia de luz solar y humedad controlada del 80%. Cabe mencionar que, para la aplicación de esta técnica solo se necesita de conocimientos básicos de buenas prácticas agrícolas.

Del mismo modo Peña et al. (2021) determinaron, que las plantas arvenses *Conyza bonariensis*, *S. nigrum*, *E. colonum*, *E. indica*, *R. cochinchinensis* y *C. verticillata* acumularon mayor cantidad de cadmio en sus raíces. Por otra parte, *P. pellucida*, *C. cephalotes* y *A. conyzoides*, son consideradas plantas hiperacumuladoras debido a la capacidad de acumular Cd en la biomasa aérea. Por lo tanto, este comportamiento ocurre por la precipitación de Cd por exudados bacterianos y radicales, absorción y secuestro bacteriano.

El uso de hongos *Micorrizicos Arbusculares* y *Commelina erecta* L. reduce el contenido de Cd en las almendras de cacao, es decir al incrementar la materia orgánica del suelo reduce la concentración de cadmio en las almendras de cacao. Esto ocurre porque la materia orgánica neutraliza al Cd y lo hace menos disponible para la absorción de las raíces. Los hongos causantes de las micorrizas tienen la capacidad de encapsular los metales pesados y a esto se suma el efecto bioabsorbente de la *Commelina*, siendo capaz de reducir la disponibilidad de Cd en el suelo.

5.3 Enmiendas del suelo

Las enmiendas permiten corregir los niveles de acidez en los suelos e incrementan el contenido de bases y neutralizan los protones. Además, las enmiendas alteran las características del suelo, como el pH o el contenido de materia orgánica. La aplicación de enmiendas a los suelos ácidos que aumentan el pH, reduce la biodisponibilidad de Cd, por ende, las plantas disminuyen la absorción de Cd (Ramtahal et al., 2018). Huamaní & Huauya (2018) demostraron que, la aplicación de 13,5 kg de cáscara de cacao por planta reduce el contenido de Cd en las almendras hasta 0,533 ppm. La aplicación de enmiendas y sobre todo de origen natural, favorece las condiciones del suelo (Zeng et al., 2019).

Zavala-Solorzano et al. (2022) afirman, que la aplicación de enmiendas orgánicas líquidas disminuye la absorción del Cd del suelo, por parte de la planta de cacao y el contenido de Cd se reduce en las hojas y las almendras de cacao. El mismo estudio destaca que el T5 (80 l/ha Enmienda líquida orgánica + 4 l/ha de Enmienda carbón líquido) disminuyó significativamente el contenido total de Cd disponible del suelo en un 73,58% y el T4 (80 l/ha Enmienda líquida orgánica + 2 l/ha de Enmienda carbón líquido) redujo el contenido de Cd hasta en 62,96% en las almendras de cacao.

Se ha demostrado que el contenido de cadmio en las almendras de cacao disminuye hasta el 0,25 ppm por la aplicación de enmiendas orgánicas, por sus propiedades quelantes que inmovilizan el Cd y por ende disminuye la absorción en las plantas. Asimismo otros autores sostienen que la aplicación de enmiendas al suelo aumentan el pH de este y reduce la biodisponibilidad de cadmio para las plantas (Meter et al., 2019; Peña et al., 2021; Valarezo et al., 2022).

5.4 Biochar

El biocarbón o biochar es un carbono altamente poroso y enriquecido, producido a partir de la descomposición térmica de la biomasa, bajo un sistema restringido de oxígeno (pirólisis) y con temperaturas entre 300 y 700 °C.

Bravo et al. (2019) evaluaron la aplicación del biocarbón (Farmlandmiracle) y disminuyeron hasta el 99% del contenido de cadmio en el suelo y un 97% en las almendras de cacao con respecto al valor inicial. Las propiedades de absorción del biocarbón están asociadas a su alta capacidad de intercambio catiónico, pH alcalino y presencia de grupos funcionales (hidroxilo, carboxilo y fenólicos). La efectividad del biocarbón también depende de las propiedades del suelo y el tipo de biocarbón. De hecho, la reducción del cadmio tiene mayor efectividad cuando el biocarbón se aplica en suelos con pH ácido, textura gruesa y contenido medio de carbono orgánico Vanderschueren et al. (2021).

Según los resultados presentados por Silva et al. (2022) el uso del biocarbón derivado de la cascara de *Theobroma cacao* L. disminuyó el contenido de Cd en el cultivo. De hecho obtuvo mayor eficiencia en la inmovilización de Cd en el suelo con la combinación del biocarbón de cascara de arroz *Oryza sativa* en una concentración del 8%.

Asimismo López et al. (2022) afirman que, la aplicación de biocarbón de los residuos de quinua al 2% aumentó el pH del suelo y la capacidad efectiva de intercambio catiónico, por lo que existe menor biodisponibilidad de Cd en el suelo.

6. Técnicas de reducción de cadmio en la pos cosecha

6.1 Ecurrido de mucílago

Consiste en cosechar y extraer las almendras de cacao de las mazorcas y drenar los líquidos para lavar la pulpa de las almendras de cacao antes de llegar al proceso de fermentación. Es importante mencionar, que el Cd se distribuye de manera desigual en el fruto de cacao, y en el mucílago de cacao se ha encontrado la mayor concentración de Cd (Cruz et al., 2021).

Durante la etapa de pos cosecha el escurrido del mucílago por 12 horas redujo significativamente el contenido de cadmio en las almendras de cacao CCN-51. Asimismo, con el escurrido del mucílago de las almendras de cacao en mallas durante 24 horas redujo hasta un 29,23% del contenido de Cd (FAO/OMS, 2021).

De la misma forma Cruz et al. (2021) determinaron, que el pre escurrido del mucílago disminuyó el contenido de Cd con respecto a las almendras secas sin pre escurrido. Cabe destacar que el escurrido del mucílago no afecta la calidad física u organoléptica de las almendras de cacao.

6.2 Durante la fermentación

La postcosecha también es una alternativa viable para reducir el contenido de Cd en las almendras de cacao. Vanderschueren et al. (2019) sostiene, que una fermentación prolongada permite que el Cd migre desde la semilla a la testa cuando el pH de las semillas es menor a 5. Hay que tener en cuenta que el Cd es móvil y tiende acumularse en el endospermo, pericarpio, mucílago y la testa de las almendras de cacao. Por ende, durante la fermentación las levaduras producen las enzimas pectinolíticas, estas hacen que el mucílago drene.

Posteriormente, las bacterias ácido lácticas (oxidación) producen ácidos orgánicos Cd-lactato y Cd-acetato, Cd-citrato y otras moléculas Cd-histidina, Cd-fitado, Cd-cisteína y Cd-glutacion que interaccionan con el Cd y permite su reducción (D. Bravo et al., 2021; Cruz et al., 2021).

Igualmente, Morejon et al. (2022) concluyeron, que a medida que aumenta el tiempo de fermentación de las almendras de cacao con la adición de enzimas polifenol oxidasas "PPO" del banano y levaduras *Saccharomyces cerevisiae* disminuye el contenido de cadmio. En la misma investigación Morejon et al. (2022), determinaron

que el menor contenido de cadmio se obtuvo al fermentar las almendras de cacao por 120 horas. Además, Morejon et al. (2022) realizó un análisis sensorial de la pasta de cacao de las almendras fermentadas con las enzimas polifenol oxidasas "PPO" del banano y las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* e indica que una fermentación con un pH muy bajo puede producir un sabor ácido y desagradable.

Vanderschueren et al. (2022) afirma que, durante la fermentación la migración de Cd desde las almendras de cacao a la testa probablemente está asociada a la acidificación. También indica, que las enmiendas de ácidos orgánicos antes o durante la fermentación fueron ineficaces en la reducción del pH de las almendras. Pero, la aplicación de ácido acético o láctico durante la pos-fermentación redujo el pH de las almendras de cacao.

Vera-Chang et al. (2023) redujeron el contenido de cadmio en las almendras de cacao trinitario con la adición de la bacteria *Rhizobium japonicum* en el proceso de fermentación llevada a cabo en cajas de madera tipo Rohan y en hieleras. Mientras que Camargo et al. (2024) evidenciaron, que aumentar la temperatura media durante la fermentación reduce el pH de las almendras, y en consecuencia facilita la migración del Cd desde la almendra a la testa.

En la Tabla 1 se presenta los principales métodos y técnicas para reducir el contenido de cadmio en el cultivo y durante el procesamiento de las almendras de cacao.

Tabla 1

Principales métodos para reducir el contenido de cadmio en el cultivo y procesamiento de cacao

Método	Técnica	Descripción	Referencia
Biorremediación	Uso de bacterias y hongos tolerantes al cadmio	Se emplean bacterias como <i>Burkholderia cepaciae</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i> que toleran altas concentraciones de cadmio, promoviendo la reducción de cadmio mediante procesos de biosorción.	Ayubb et al., 2017
Fitorremediación	Plantas hiperacumuladoras	Plantas como <i>Solanum nigrum</i> y <i>Amaranthus hybridus</i> absorben y almacenan cadmio en sus tejidos, disminuyendo la cantidad de cadmio disponible en el suelo.	Ramírez et al., 2018
Enmiendas del suelo	Aplicación de compost y biochar	La adición de compost y biocarbón aumenta el pH del suelo, reduciendo la biodisponibilidad de cadmio y su absorción por las plantas de cacao.	Zavala-Solorzano et al., 2022
Biochar	Biochar de cáscara de cacao y arroz	El biochar derivado de cáscara de cacao y arroz inmoviliza cadmio en el suelo, siendo más efectivo en suelos ácidos, mejorando la estructura del suelo y reduciendo la absorción de cadmio.	Bravo et al., 2019
Técnicas postcosecha	Escurrido del mucílago	Escurrir el mucílago de las almendras de cacao por 12-24 horas ayuda a reducir el cadmio en las almendras sin afectar su calidad física y organoléptica.	Alimentarius, 2019
Técnicas postcosecha	Fermentación prolongada	Prolongar la fermentación permite que el cadmio migre a la testa, facilitando su reducción y posterior eliminación en los procesos de descascarillado.	Vanderschueren et al., 2022

7. Desafíos actuales y futuros

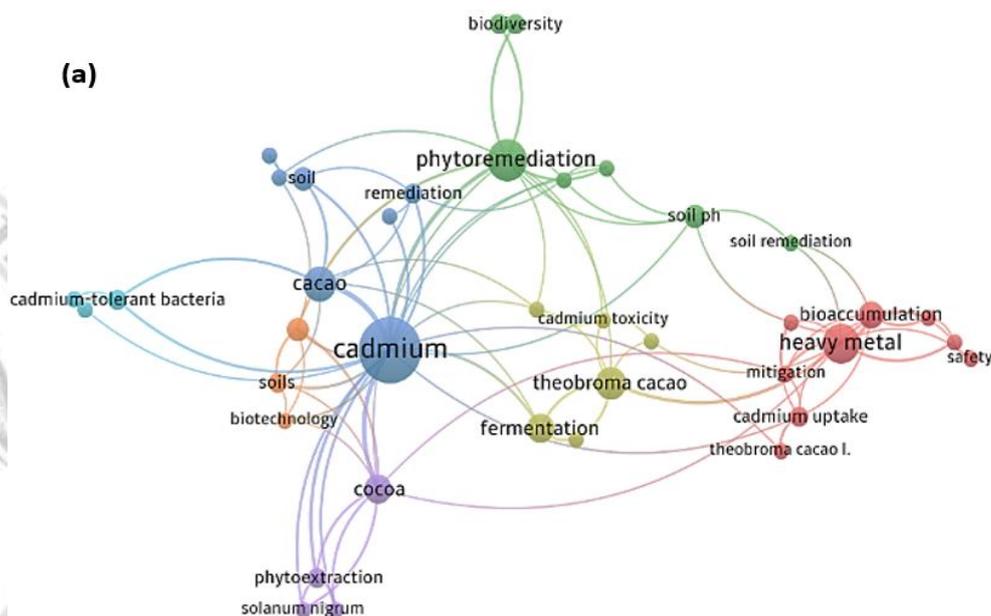
El cacao constituye un rubro muy importante para el sector agrícola ecuatoriano. Sin embargo, en algunos estudios se ha encontrado altos niveles de Cd en chocolates, lo que podría afectar la salud humana. Por esta razón, a partir del 2019 la Unión Europea implementó normativas para niveles máximos permisibles de Cd en chocolates y almendras de cacao, por lo que, se convierte en una problemática nacional, puesto que la Unión Europea es uno de los principales destinos de exportación del cacao ecuatoriano. En este sentido, Ecuador aún se encuentra en sus primeras etapas en cuanto a estrategias para disminuir y reducir la movilidad y acumulación de Cd.

La biorremediación es una alternativa ecológica que tiene suficiente potencial para reducir el cadmio del suelo. Canchignia et al. (2021) plantea que las bacterias y hongos nativos presentan mayor tolerancia y capacidad biorremediadora, por lo que se requiere que estos sean aislados, caracterizados, propagados y reintroducidos a las plantaciones de cacao.

El análisis bibliométrico utilizando los criterios de búsqueda: "Cadmium", "*Theobroma cacao*", "Mitigación", "reducir cadmio en cacao", "biorremediación" y "fitorremediación" permitió evidenciar 88 artículos científicos sobre técnicas para reducir y mitigar el Cd desde 2015 al 2024. La Figura 1a muestra la red de conexión de términos del análisis de la co-ocurrencia de palabras clave usando el programa VOSviewer. Cada ítem en la red simboliza una palabra clave, y el tamaño refleja la frecuencia de aparición de la

palabra clave. Cada nodo constituye una palabra clave, y el tamaño del nodo demuestra la ocurrencia de la palabra clave. Los vínculos entre los ítems representan la relación de ocurrencia entre las palabras clave, y el grosor de la línea de conexión indica la frecuencia de dicha ocurrencia. La palabra que obtuvo el mayor número de ocurrencias fue el término "cadmio" con 26 ocurrencias y 18 de fortaleza. El término "cadmio" es el nodo central y conecta con los clústeres de distintos colores, lo que indica temas diferenciados como "fitorremediación" con 11 ocurrencias y 8 de fortaleza, "metal pesado" con 10 ocurrencias y 8 de fortaleza y *theobroma cacao*. En la Figura 1a se aprecia que las palabras clave más recientes se encuentran en nodos de color amarillo y son fermentación, *Theobroma cacao* y toxicidad del cadmio. Meter et al. (2019); Vanderschueren et al. (2021) mencionan que se necesita investigar acerca de los métodos de postcosecha como la fermentación, secado, tostado, descascarillado y su impacto en la disminución del contenido de Cd en las almendras de cacao. También Intriago et al. (2019) recomiendan, otras alternativas potenciales para la remoción de Cd como el lavado con sales y el uso de algas marinas.

Para estudios futuros, Vanderschueren et al. (2021) sugieren, explorar la mitigación basada en la genética, es decir, el uso de porta injertos de baja absorción de Cd. Otros autores plantean la reducción de Cd durante la postcosecha constituye una técnica factible, económica y amigable con el ambiente que puede ser replicada fácilmente por los agricultores.



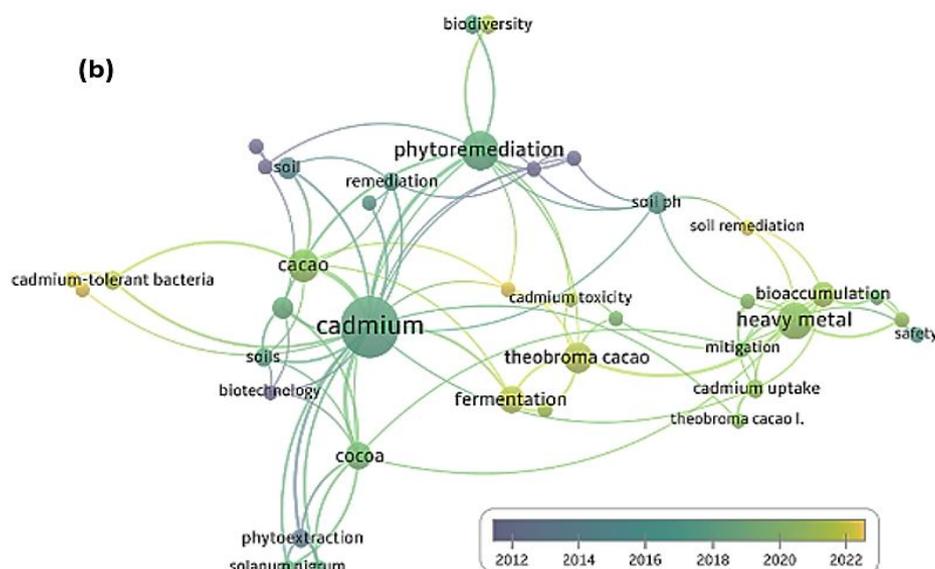


Figura 1. Co-ocurrencia de palabras clave en el programa VOSviewer. (a) visualización de redes y clústeres; (b) visualización de superposiciones en el tiempo.

La Figura 1b muestra las palabras clave en una estructura de red similar pero con una distribución temporal representada en una escala de colores que va de violeta a amarillo, las más antiguas se encuentran en nodos de color violeta y son biotecnología, metal, hiperacumuladoras, biodisponibilidad y fitoextracción, especialmente utilizadas en los periodos comprendidos entre 2012 y 2014, centrados en entender los mecanismos de resistencia del Cd en bacterias y desarrollar estrategias de biorremediación en suelos. En la Figura 1B también se aprecia que las palabras clave más recientes se encuentran en los nodos de color verde y amarillo, lo que indica un aumento en el interés y estudio sobre temas de “fermentación” y bioacumulación”. Investigaciones adicionales podrían centrarse en el uso de bacterias y hongos que toleran y degradan el cadmio en suelos agrícolas para ser usados como biofertilizantes o mejoradores del suelo, reduciendo la biodisponibilidad Cd y su absorción en las plantas de cacao.

8. Conclusiones

Se realizó una revisión sistemática dirigida a productores, técnicos y la comunidad científica, donde se aborda las principales prácticas agrícolas, técnicas de mitigación y reducción de Cd en cacao.

La fitorremediación es una tecnología prometedora para la remediación de suelos contaminados con Cd, existen una gran variedad de plantas tolerantes al Cd, sin embargo, esta técnica presenta algunas limitaciones como: largos

periodos de tiempo, es eficaz en suelos con bajos niveles de Cd, por lo que, es recomendable combinar con la aplicación de enmiendas del suelo y fertilización, lo que hace que incremente los costos. Mientras que, la biorremediación presenta mayor potencial para ser aplicada en sistemas de producción de cacao, minimiza la biodisponibilidad de Cd para las plantas de cacao, favorece las condiciones nutricionales del suelo, es amigable con el medio ambiente y es de menor costo. Por otra parte, las técnicas pos cosecha resultan alternativas prometedoras viables y efectivas que disminuyen significativamente el contenido Cd de las almendras de cacao. Sin embargo, hasta la actualidad los resultados en la búsqueda de investigaciones de técnicas pos cosecha fueron limitados. Actualmente, se requieren realizar investigaciones en técnicas para disminuir el contenido de Cd en almendras de cacao usando tipos de fermentadores, agentes quelantes, microorganismos, presecado y lavado. La mejor combinación de estrategias para reducir el contenido de cadmio en los suelos y plantas de cacao acorde a la revisión realizada incluye la biorremediación, utilizando microorganismos como *Burkholderia* spp. y *Trichoderma* spp., que inmovilizan el Cd y promueven el crecimiento vegetal. La fitorremediación con plantas hiperacumuladoras, como *Solanum nigrum*, también es efectiva, especialmente cuando se combina con hongos micorrízicos y materia orgánica que disminuyen la absorción de Cd. Las enmiendas del suelo, como cáscara de cacao y biocarbón, aumentan el pH y reducen la biodisponibilidad de

cadmio. Además, el uso de biochar incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo, lo que contribuye a una mayor inmovilización del metal. Finalmente, las técnicas de postcosecha como el escurrido del mucílago y una fermentación controlada ayudan a reducir la concentración de Cd en las almendras de cacao.

Por otra parte, es esencial que los microorganismos puedan sobrevivir y actuar en las condiciones específicas de la fermentación del cacao. Los estudios futuros deben enfocarse en la adaptación de bacterias y levaduras a factores como temperatura. Las bacterias ácido-lácticas deben ser capaces de sobrevivir y mantenerse activas a temperaturas que puedan alcanzar hasta 50 °C. Tolerante a los cambios de pH, que en la fermentación de cacao varía de ácido a neutro. Las cepas que muestren estabilidad y capacidad de crecimiento en rangos amplios de pH serían seleccionadas para un proceso de mitigación del cadmio. Los microorganismos seleccionados no deben interferir en el sabor y aroma que se desarrolla durante la fermentación para no afectar la calidad del cacao y como podrían influir en el tiempo de fermentación, es decir, si aceleran o retardan el proceso.

Referencias bibliográficas

- Amjad, K. M., Khan, S., Khan, A., & Alam, M. (2017). Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. In *Science of the Total Environment* (Vols. 601–602, pp. 1591–1605). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.030>
- ANECACAO. (2024). *Anecacao, tradición e innovación* (A. A. Robles (ed.); 27th ed.). <https://anecacao.com/>
- Ayubb, N., Cerra, A., Chamorro, L., & Pérez, A. (2017). Resistencia a cadmio (Cd) de bacterias endófitas y bacterias rizosféricas aisladas a partir de Oriza sativa en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 9(2), 281. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.n2.2017.610>
- Barraza, F., Schreck, E., L. T., Uzu, G. C., L. F., Ruales, J., Prunier, J., Marquet, A., & Maurice, L. (2017). *Contaminación ambiental bioacumulación cadmio y bioaccesibilidad gástrico en el cacao*: Un. 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
- Bravo, C., Alemán, R., Freile, J., Reyes, F., Andino, M., Alba, J., Pérez, Y., & Marino, E. (2019). Evaluación del uso de un biocarbón sobre la absorción de cadmio del suelo y la productividad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Iberoamericana*, 2(1), 6–15. <https://doi.org/10.46380/rias.v2i1.33>
- Bravo, D., León-Moreno, C., Quiroga, R., Zamora, A., Gutiérrez, E., Moreno, E., Duarte, D., Aristizábal, A., Arroyave, C., Cardona, L., Olarte, H., Orozco, M., & Guerra-Sierra, B. (2021). Recomendaciones mínimas para la mitigación de cadmio. In *Agrosavia* (Primera Ed, p. 14).
- Camargo, I. D., Rodríguez-Silva, L. G., Carreño-Olejua, R., Montenegro, A. C., & Quintana-Fuentes, L. F. (2024). High temperature and nib acidification during cacao-controlled fermentation improve cadmium transfer from nibs to testa and the liquor's flavor. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62609-8>
- Canchignia, Martínez Fabricio Auhing, A. J., Cedeño, M. 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.). https://balcon.mag.gob.ec/mag01/magapaldia/Caja_de_Herramientas_Cadmio_Cacao/
- Cayotopa-Torres, J., Arévalo-López, L., Pichis-García, R., Olivera-Cayotopa, D., Rimachi-Valle, M., & Márquez-Dávila, K. (2021). New cadmium bioremediation agents: *Trichoderma* species native to the rhizosphere of cacao trees. *Scientia Agropecuaria*, 12(2), 155–160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>
- Cedeño, C. E. P., & Dilas-Jiménez, J. O. (2022). Producción y exportación del cacao ecuatoriano y el potencial del cacao fino de aroma. *Qantu Yachay*, 2(1), 08–15. <https://doi.org/10.54942/qantuyachay.v2i1.17>
- COMISIÓN EUROPEA. (2014). Reglamento (UE) No 488/2014 de la Comisión. In *Diario Oficial de la Unión Europea* (Vol. 9, Issue 2). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.1975>
- Cordoba-Novoa, H. A., Cáceres-Zambrano, J., & Torres-Rojas, E. (2023). Isolation of native cadmium-tolerant bacteria and fungi from cacao (*Theobroma cacao* L.) - Cultivated soils in central Colombia. *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22489>
- Cruz, P. D., Guaitero, P. G., & Correa-Rueda, L. (2021). Contenido de cadmio en el grano de cacao *theobroma cacao* L. seco, obtenido en la fermentación con pre y sin pre escurrido, en San Vicente de Chucurí. *Revista Citecsa*, 13(21), 10.
- Dos Santos, M. L. S., De Almeida, A. A. F., Da Silva, N. M., Oliveira, B. R. M., Silva, J. V. S., Junior, J. O. S., Ahnert, D., & Baligar, V. C. (2020). Mitigation of cadmium toxicity by zinc in juvenile cacao: Physiological, biochemical, molecular and micromorphological responses. *Environmental and Experimental Botany*, 179, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104201>
- FAO/OMS. (2021). Anteproyecto de niveles máximos para el cadmio en el chocolate y productos derivados de cacao. Comisión del Codex Alimentarius 2014. *Comisión Del Codex Alimentarius 2014*. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/es/>
- Feria-Cáceres, P. F., Penagos-Velez, L., & Moreno-Herrera, C. X. (2022). Tolerance and Cadmium (Cd) Immobilization by Native Bacteria Isolated in Cocoa Soils with Increased Metal Content. *Microbiology Research*, 13(3), 556–573. <https://doi.org/10.3390/microbiolres13030039>
- Furcal-Beriguete, P., & Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 33, 122–137. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- Hamzah, A., Hapsari, R. I., & Wisnubroto, E. I. (2016). Phytoremediation of Cadmium-contaminated agricultural land using indigenous plants. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 2(1), 8–14.
- Huamani, H., & Huauya, M. (2018). Efecto de materia orgánica en el contenido de cadmio en almendras de cacao orgánico en Perú. *Investigación y Amazonía, Tingo María*, 8(5), 22–26.
- Intriago, F. G., Talledo, M. V., Cuenca, G. J., Macías, J. R., Álvarez, J. R., & Menjivar Flores, J. C. (2019). Evaluación del contenido de metales pesados en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) durante el proceso de beneficiado. *Pro Sciences*, 3(26), 17–23. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol3iss26.2019pp17-23>
- Jiménez, C. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Producción + Limpia*, 10(1), 89–104.
- López, J. E., Arroyave, C., Aristizábal, A., Almeida, B., Builes, S., & Chavez, E. (2022). Reducing cadmium bioaccumulation in *Theobroma cacao* using biochar: basis for scaling-up to field. *Heliyon*, 8(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09790>
- Ma, B., Song, W., Zhang, X., Chen, M., Li, J., Yang, X., & Zhang, L. (2023). Potential application of novel cadmium-tolerant bacteria in bioremediation of Cd-contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114766>
- Meter, A., Atkinson, R., & Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe – Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Bioversity International*, 9. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Morejón, L. R., Vera, C. J., Salgado, T. I., Flores, M. C., & Morejón, C. M. (2022). Use of enzymes and leavening agents as a strategy to reduce the presence of cadmium in the fermentation process of Theobroma cacao L. almonds. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 13(3), 604–614. <https://doi.org/10.47750/pnr.2022.13.03.089>
- Nieves, Y., Parra, N., Villanueva, S., & Henríquez, M. (2019). Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio. *Revista Ingeniería UC*, 26(1), 96–104. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24585.70249>
- Núñez, L. A. R., Meas, V. Y., Ortega, B. R., & Olguín, E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Biotecnología y Biología Molecular*, 69–83.
- Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2), 161–168.
- Peña, K., Carrillo, M., Durango, W., & Orozco, P. (2021). *Guía 13. Mitigación del cadmio por fitorremediación. Caja de herramientas para la prevención y mitigación de la contaminación de cadmio en la cadena de cacao-Ecuador* (1ra. ed.).
- Pérez Moncada, U. A., Gómez, M. R., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Wilches Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo Estrada, G. A. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a strategy to reduce the absorption of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao*) plants. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121–130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Ramírez, P. R., Giraldo, J. D., & Barrera, C. D. (2018). Fitoextracción de cadmio con hierba mora (*Solanum nigrum* L.) en suelos cultivados con cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agronomica*, 67, 420–424.
- Ramtahal, G., Chang, Y. I., Hamid, A., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., & Harrynanan, L. (2018). The Effect of Liming on the Availability of Cadmium in Soils and Its Uptake in Cacao (*Theobroma cacao* L.) in Trinidad & Tobago. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(19), 2456–2464. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1510955>
- Reyes, G. S., Gómez, A. L. J., & Guio, G. J. J. (2020). Evaluación de la eficiencia de micorrizas arbusculares y plantas de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) como agentes fitorremediadores para la reducción de cadmio en cultivos de cacao de la granja del centro de atención al sector Agropecuario - SENA. *Revista de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico Del COMM*, 1(2), 97–102.
- 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 Biol Colomb.*, 25(3), 333–344. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n3.78746>
- Santander, R. W., Garay, M. R., Verde, G. C., & Mendieta, T. O. (2021). Determinación Del Contenido De Cadmio En Suelos, Frutos, Granos Fermentados Y Secos, Licor De Cacao Y Chocolate En Zonas Productoras De La Región San Martín. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 87(1), 39–49. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i1.321>
- Silva, G. C., Oré, C. L., Loarte, A. W., Silva, C., Oré, L., & Loarte, W. (2022). Biocarbón de biomasa residual agrícola y su influencia en la inmovilización de cadmio en el suelo. *Revista Científica y Tecnológica QANTU YACHAY*, 2(2), 88–99. <https://doi.org/10.54942/qantuyachay.v2i2.32>
- Valarezo, J. X., Carrillo, Z. M. D., Rubio, Z. G. A., Peña, S. K. E., & García-Orellana, Y. (2022). Omisión de macronutrientes y biodisponibilidad de cadmio en suelos de Ecuador. *Acta Agronómica*, 71(3), 248–257. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.105855>
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N., & Marín, C. (2022). Una alta diversidad de hongos micorrízicos arbusculares influye en la absorción de cadmio y crecimiento vegetativo del cacao. *Bioagro*, 34(1), 75–84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: Reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment*, 781, 146779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779>
- Vanderschueren, R., De Mesmaeker, V., Mounicou, S., Isaure, M. P., Doelsch, E., Montalvo, D., Delcour, J. A., Chavez, E., & Smolders, E. (2019). The impact of fermentation on the distribution of cadmium in cacao beans. *Food Research International*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108743>
- Vanderschueren, R., Doevenspeck, J., Helsen, F., Mounicou, S., Santner, J., Delcour, J. A., Chavez, E., & Smolders, E. (2022). Cadmium migration from nib to testa during cacao fermentation is driven by nib acidification. *LWT*, 157, 113077. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113077>
- Vanderschueren, R., & Pulleman, M. (2021). Cadmio en cacao: de dónde viene, cómo se regula y por qué preocupa a los productores. *Resumen Informativo de Clima-LoCa* Número 1. <https://climaloca.org/publications/cadmio-en-cacao-de-donde-viene-como-se-regula-y-por-que-preocupa-a-los-productores/>
- Vera-Chang, J., Benavides-Veras, J., Vásquez-Cortez, L., Alvarado-Vásquez, K., Reyes-Pérez, J., Intriago-Flor, F., Naga-Raju, M., & Castro-Triana, V. (2023). Efectos de dos métodos fermentativos en cacao (*Theobroma cacao* L.) trinitario, inducido con *Rhizobium japonicum* para disminuir cadmio. *Revista Colombiana de Investigación Agroindustriales*, 10(1), 95–106. <https://doi.org/10.23850/24220582.5460>
- Zavala-Solorzano, J. W. J. W., Repoma-Rodríguez, N. D., Lao-Olivares, P. C., Aguilar-Guizado, J. K., Repoma-Rodríguez, D. N., Lao-Olivares, C. P., & Aguilar-Guizado, J. K. (2022). Enmiendas líquidas orgánicas en la reducción de cadmio en suelo, hojas y almendras de cacao. *Agroindustrial Science*, 12(2), 199–205. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.02.10>
- Zeng, H., Chen, L., Zhou, X., & Zeng, Q. (2019). Cadmium accumulation in winter crops and the assessment of paddy soil phytoremediation in southern China. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05054-9>
- Zhong, L., Lin, L., Liao, M., Wang, J., Tang, Y., Sun, G., Liang, D., & Xia, H. (2019). Phytoremediation potential of *Pterocypselaciniata* as a cadmium hyperaccumulator. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04702-4>