

Cadmio en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao L.*) y sus efectos ambientales.

Cadmium in cocoa (*Theobroma cacao L.*) cultivation and its environmental effects.

Recepción: / Aceptación: / Publicación:

Resumen

Un tema de mucha transcendencia en la actualidad agrícola es la presencia del cadmio en el cultivo de cacao; dado que compromete severamente la salud, seguridad alimentaria y al medioambiente. Aunque la demanda de cacao crece significativamente, la presencia de este contaminante es una limitante potencial para su exportación y comercialización. Este artículo describe los efectos ambientales que provoca el cadmio en la planta de cacao, en los ecosistemas suelo-agua, en la salud humana y algunos conflictos socioeconómicos. En este sentido, a través de una revisión bibliográfica sistemática e información disponible en bases de datos, se presenta un enunciado enfocado básicamente al cadmio como uno de los metales más tóxicos e inhibitorios de los procesos fisiológicos de las plantas ya que reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, la transpiración y el contenido de clorofilas, además de provocar un desbalance nutricional importante en las plantas con sus consecuentes efectos sobre la productividad. Su acumulación degrada el suelo, altera sus propiedades químicas (nutrientes y pH), físicas (textura, permeabilidad, retención de agua y densidad) y biológicas (hongos y bacterias), perdiendo su capacidad de autodepuración. En las partes aéreas de las plantas permite su paso a la cadena trófica donde se bioacumula, provocando efectos perjudiciales en la salud de las personas, dañando principalmente riñones e hígado, pudiendo provocar nefropatía y daño hepático irreversible. La ingesta continuada de este metal pesado puede provocar fragilidad ósea.

Palabras clave: Cacao, cadmio, ambiente, salud

Abstract

A critical issue in agriculture today is the presence of cadmium in the cocoa crop, as it severely compromises health, food safety, and the environment. Although the demand for cocoa is growing significantly, the presence of this contaminant is a potential limiting factor for its export and commercialization. This article describes the environmental effects of cadmium on the cocoa plant, soil-water ecosystems, human health, and some socio-economic conflicts. In this sense, through a systematic literature review and information available in databases, a statement is presented, basically focused on cadmium as one of the most toxic and inhibitory metals in plant physiological processes since it reduces growth, photosynthetic activity, transpiration, and chlorophyll content, in addition to causing a significant nutritional imbalance in plants with consequent effects on productivity. Its accumulation degrades the soil alters its chemical (nutrients and pH), physical (texture, permeability, water retention, and density), and biological (fungi and bacteria) properties, losing its self-purification capacity. In aerial parts of plants, it allows its passage to the trophic chain where it bioaccumulates, causing harmful effects on people's health, mainly damaging kidneys and liver, which can cause nephropathy and irreversible liver damage. Continued ingestion of this heavy metal can cause bone fragility.



Keywords: Cocoa, cadmium, environment, health

Introducción

El consumo de chocolate a nivel mundial y la oportunidad para el desarrollo de los actores de la cadena de valor, en particular de los agricultores, se ve reflejada en los 1.8 millones de hectáreas que actualmente están destinadas para su producción; superficie que ha crecido de manera sostenida desde el 2006 y que ha significado un incremento en la producción, y, por tanto, oferta de sus productos, en especial del grano de cacao. (FAO [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura], 2018). En varios países de América Latina y el Caribe (ALC), el cacao es un cultivo tradicional de importancia, pues desde la época de la colonia, ya se lo producía con fines de exportación, por lo que se ha constituido en un dinamizador de sus economías (Sánchez et al., 2019).

Existen diversos retos a los que se enfrenta esta especie: la escasa disponibilidad de mano de obra, la existencia de enfermedades limitantes como las causadas por *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora* spp., productores de cacao que a menudo viven por debajo del umbral de la pobreza (Fountain y Adams 2020) y las restricciones establecidas por los países consumidores frente a la presencia de metales pesados que son bioacumulados y que generan problemas a la salud humana (Antolinez et al., 2020). En el caso del cadmio, se ha llegado a evidenciar presencia tanto en la almendra como en el producto transformado (Gramlich et al., 2018).

En el periodo 2017-2018 la producción de cacao en América fue aproximadamente de 748 mil toneladas lo que representa un 16,3 % de la producción mundial y aproximadamente 1.700 millones de dólares norteamericanos. Sin embargo, a causa de las regulaciones efectuadas el 1 de enero de 2019 por la Unión Europea donde se hace énfasis de las concentraciones permitidas de cadmio (Cd) en el chocolate y productos derivados de cacao, las exportaciones al mercado europeo estarían afectadas gravemente (Nieves et al., 2019), convirtiéndose también en un impacto socioambiental, que afecta las exportaciones y calidad de vida de los involucrados de la cadena de valor.

A nivel global y local la creciente problemática de contaminación por metales pesados, especialmente de cadmio en el cultivo de cacao, podría comprometer severamente la salud, seguridad alimentaria y al medioambiente. Esta situación revela la necesidad de entender la relación que existe entre el cadmio y sus efectos en la planta de cacao, en los ecosistemas, en el suelo y agua, en la salud humana, algunos de los conflictos socioeconómicos y ambientales. Adicionalmente se exponen las concentraciones de cadmio en algunos países productores de cacao, especialmente del Ecuador.

Metodología

La metodología aplicada para el desarrollo de este artículo es bibliográfica documental, de tal manera que se obtuvo, se seleccionó, se interpretó y analizo información existente en publicaciones indexadas en bases de datos como: Scielo, Web of Science, Scopus, Latindex, Redalyc, entre otras; al igual que en libros y capítulos de libros, resúmenes in extenso de memorias de congresos e informes técnicos sobre temas relacionados con la descripción general del cultivo de cacao, la



descripción del contaminante (Cadmio) con la finalidad de exponer las relaciones existentes entre los componentes del ecosistema y el efecto de este metal pesado sobre las plantas de cacao. La búsqueda se realizó restringiendo los resultados a palabras clave como: cadmio, cadmio en cacao, toxicidad del cadmio, cadmio en la salud humana, cadmio en plantas y medioambiente.

Resultados

Descripción general del cultivo del cacao

El cacao es una planta originaria de las selvas tropicales del continente americano. Vive a la sombra de los bosques en suelos húmedos, bien drenados y ricos en materia orgánica. Requiere precipitaciones anuales superiores a 2000 mm y temperaturas superiores a 16°C. Se distribuye únicamente entre los 18° norte y los 15° sur de latitud, y prospera desde el nivel del mar hasta los 1.000 metros sobre el nivel del mar. (Ogata, 2007).

La Organización Internacional del Cacao (ICCO), reconoce tres variedades: tipo Criollo, el cual dominó el mercado hasta mediados del siglo XVIII, considerado como cacao puro; tipo Forastero, el amelonado es el más cultivado en muchos países de América Latina y el tipo Trinitario que descende de un cruce entre Criollo x Forastero (Acebo, et al., 2016).

Al cultivo de cacao establecido se le debe proporcionar sombra adecuada desde el momento del trasplante hasta que crezca y desarrolle suficientemente para ocasionar autosombramiento, o hasta que la sombra permanente se haya establecido completamente y de buena cobertura de cacao (Quiroz y Mestanza, 2012).

Su consumo a nivel mundial es significativo, los granos de cacao son fuente de materia prima para la elaboración del chocolate, uno de los commodities agrícola con mayor incremento en consumo de los últimos años, la demanda en cantidad y calidad ha sostenido un aumento en el precio de la almendra fermentada y seca (Intriago et al., 2019; Lara et al., 2016). Se usa también como ingrediente básico dada la revaloración de la exquisitez de sus granos para una alimentación saludable, (Huamanchumo, 2017), su alto contenido vitamínico, como de minerales, antioxidantes y calorías; además de su exquisito aroma y sabor, le ha permitido conquistar el mercado internacional, (Mendoza et al., 2021).

A nivel mundial existen 58 países que produjeron cacao durante el periodo comprendido entre el 2010 y el 2020. Los 10 principales productores en este periodo fueron Côte d'Ivoire, Ghana, Indonesia, Nigeria, Camerún, Brasil, Ecuador, Perú, República Dominicana y Colombia con rendimiento de granos que van desde 61.571,82 hasta 1.763.407,82 toneladas (Figura 1).

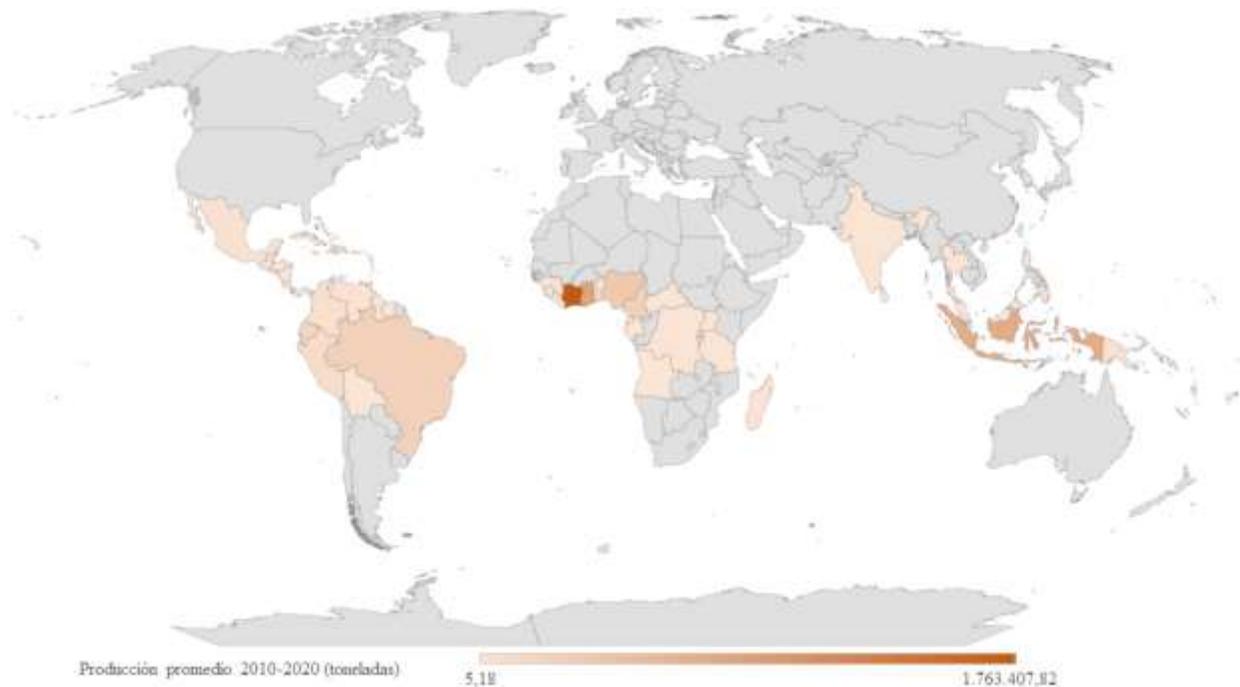


Figura 1. Producción mundial de granos de cacao en toneladas por país durante el periodo 2010-2020. (Adaptado a partir de información obtenida en FAOSTAT,2010)

En el continente africano (Costa de Marfil), se encuentra ubicado los principales productores de cacao que aproximadamente contribuyen con el 70 % de la producción mundial. En América, la producción se enfoca en cultivos de cacao fino y de aroma, principalmente en Ecuador, Perú, Brasil, Colombia, México, entre otros (Antolinez et al., 2020). En Ecuador en el año 2020, la superficie plantada de cacao a nivel nacional fue de 590.579 hectáreas y una producción de 327.903 toneladas (INEC, 2021).

Descripción del contaminante: Metales pesados-Cadmio (Cd)

Khan (2015), precisa a los metales pesados como elementos con un peso específico igual o superior a 5 g cm^{-3} que tienen su origen en causas naturales y también como consecuencia de actividades antropogénicas (desechos industriales, emisión de gases de los automóviles y las prácticas agronómicas (Aikpokpodion, 2012), como lo asevera Satarug (2019), la explotación minera, contaminación del suelo, agua, plantas y animales a causa de la industrialización, uso intensivo de fertilizantes, y otras actividades convenientes al desarrollo actual de las sociedades han favorecido el acrecimiento exagerado de metales pesados: mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), entre otros.

Maddela et al. (2020), se refiere específicamente al cadmio (Cd) como un metal presente en el suelo, producto de la meteorización de las rocas y erupciones volcánicas, fosfatos marinos y por aportes de actividades humanas (explotación minera, la fundición y refinación de metales no ferrosos, la quema de combustibles fósiles, la aplicación de fertilizantes fosfatados y la quema de residuos industriales y urbanos, considerándolo un tóxico y riesgos a la salud humana, especialmente a los niños. Huaraca et al. (2020), lo presenta como un problema ambiental, al ser un metal altamente tóxico, con un alto poder de persistir en el suelo por periodos largos a causa de la mínima pérdida microbiana y química; y Chávez et al. (2016) expone que *Theobroma Cacao L.* puede absorber el cadmio (Cd) presente en el suelo y posteriormente acumularlo en sus

almendras. La gravedad de este metal depende de su toxicidad específica, bioacumulación, persistencia y no biodegradabilidad (Wang et al., 2015).

Rodríguez et al. (2008), afirma que el cadmio es un metal pesado no esencial y poco abundante en la corteza terrestre, sin embargo, en las últimas décadas ha aumentado considerablemente su acumulación, como consecuencia de la actividad industrial, Pérez (2020), lo reafirma al detallar que la proporción de este metal en los ecosistemas es bastante baja de forma natural que en ríos su concentración puede alcanzar valores altos de entre 10 y 500 mg/ml, aunque depende de su localización y la actividad antropogénica a la que esté asociado, mientras que en océano abierto la concentración puede oscilar entre 0,5 y 10 mg/ml, se puede encontrar cadmio en la atmósfera, no obstante, su persistencia en la misma es baja, es decir se deposita fácilmente. En suelos su concentración media oscila entre 0,15 y 0,2 ppm, aunque su concentración es dependiente del tipo roca existente.

Varios son los usos del cadmio que van desde pinturas, plásticos, pilas, baterías, abonos, soldaduras, asbestos, pigmentos, barras (reactores nucleares), farmacéutica, fotografía, vidrio, porcelana, etc. (Wasson et al., 2005). Pero su principal uso son las baterías de níquel-cadmio; la actividad minera e industrial asociada a otros metales como el zinc y el cobre generan cadmio como un producto secundario. Todas estas actividades contribuyen de forma importante a la contaminación del ambiente en general, a causa de la actividad industrial y la antropización, se estima que cada año en el medioambiente 30,000 toneladas de Cd son liberadas (Järup y Åkesson, 2009).

Sin embargo, la fuente principal de contaminación de los suelos por cadmio, se da por la actividad agrícola (Pérez, 2020). (Pérez y Azcona (2012), ratifican al referirse que son los fertilizantes a base de fósforo en un (54%), [principalmente el superfosfato, (Gimeno-García et al., 1996)], la deposición aérea (41%) y la incorporación de abono de origen animal con presencia de Cd (5%), son las principales fuentes contaminantes de suelos.

Pérez (2020), menciona como un dato de importancia que la actividad antropogénica puede provocar por distintas vías un aumento en la cantidad y/o en la disponibilidad del cadmio presente en los suelos, liberando cadmio por distintos procesos o alterando determinadas características del suelo que aumenten la solubilidad del cadmio, como su pH.

Impactos ambientales en las plantas de cacao.

Charrupi y Martínez (2017), describen que el Cadmio en las plantas de cacao en proporciones ideales libera una serie de reacciones metabólicas positivas, como inducirla a diferentes tipos de expresión génica e incrementa la actividad de enzimas antioxidantes como las peroxidasas (III) y las súper oxido dismutasa (SOD) las que ayudan a hacer frente al estrés oxidativo ocasionado por los radicales libres, ayudando a prolongar su vida.

A nivel fisiológico se considera que no existen mecanismos de entrada específicos para el cadmio por ser un metal no esencial, sin embargo, existe un transportador específico de la proteína IRT1 y calcio LCT1, adjudicadas a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP). Nramp es otra familia de transportadores que se sitúa en la membrana de la vacuola, se deduce que posiblemente cumpla la función de la movilización del metal, mas no en el ingreso de este a la raíz (Thomine et al., 2000). Ya dentro de la célula existe una coordinación con ligandos de azufre como glutatión (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato (Clemens, 2006).

Huang et al., 2014 y Jinadasa et al., 2016; Hédiji et al., 2015, reconocen a este metal como uno de los más tóxicos e inhibitorios de los procesos fisiológicos de las plantas y un exceso de este metal, conlleva a cambios morfológicos, estructurales, fisiológicos, bioquímicos y moleculares como la



desorganización de cloroplastos [alterando la tasa fotosintética, cambios en el número de granos en la almendra y deformación en el núcleo de las células de la raíz reduce el crecimiento, la actividad fotosintética, la transpiración y el contenido de clorofilas (Charrupi y Martínez (2017)]. Y lo reafirma Pérez (2020) el cadmio afecta directa e indirectamente a la fotosíntesis, por un lado, reduce el contenido de pigmentos esenciales como las clorofilas, lo que a su vez afecta al proceso fotosintético.

El cadmio adicionalmente, provoca cambios en la captación y transporte de nutrientes y ocasiona estrés oxidativo y afectaciones en las actividades enzimáticas (Hernández-Baranda et al., 2019), debido a sus efectos en las membranas plasmáticas de las células y a la competencia directa entre el metal pesado y otros iones esenciales como potasio, calcio, magnesio, cobre, cinc. Provoca un desbalance nutricional importante en las plantas, lo que tiene efectos considerables sobre el crecimiento y su productividad. También tiene efectos negativos sobre el metabolismo del azufre y sobre el nitrógeno. Afecta al núcleo celular, alterando el material genético, llegando, incluso, a detener la división celular o provocando anomalías en las estructuras florales o malformaciones en los embriones de las semillas. (Pérez, 2020).

Un problema latente en el cultivo de cacao es la capacidad inherente de fitoacumular cadmio en el producto final (Mendoza et al., 2021). Se ha mostrado en varios estudios que el cacao es acumulador de Cd (Bravo et al., 2021). Se ha determinado que la sucesión de acumulación de este elemento en los tejidos de cacao se da en el siguiente orden: raíz, tallo, hojas, cáscara o testa y grano de cacao, (Mite et al., 2010) y (Chan y Hale, 2004). Existen transportadores de cationes CAX que participan en transporte de calcio y el cadmio a la vacuola; ya en la raíz el Cd puede desplazarse por la xilema mediante el apoplasto y/o a través del simplasto (Clemens et al., 2002). El Cd se acumula en la planta porque las raíces lo toman del suelo y del agua, y este se mueve dentro de ella, es un elemento móvil que se encuentra en el suelo y es transportado desde las raíces de las plantas a los tallos, las hojas y los frutos, (Bravo et al., 2021).

La alta toxicidad y biodisponibilidad del cadmio afectan a una gran cantidad de procesos fisiológicos vegetales, lo que, finalmente, resulta en una reducción de la producción agrícola. (Pérez, 2020). La acumulación de Cd en las plantas tiende a alterar su metabolismo y fisiología y, eventualmente, puede causar su muerte (DalCorso et al., 2013; Irfan et al., 2013). Sin embargo, una cantidad significativa de este debe ser incorporada para que se produzcan daños notorios en su crecimiento y desarrollo (Bingham et al., 1975). Para ejemplificar se expone dos estudios. 1. Con el objetivo de determinar los niveles de cadmio en el cacao producido en Belize, Guatemala, El Salvador, Nicaragua y República Dominicana OIRSA (2020), se monitoreo 259 muestras analizadas a la almendra, el menor valor observado fue de 0,00 mg/kg y el mayor valor fue de 0,73 mg/kg con una media de 0,15 mg/kg, y la desviación estándar de 0,18 mg/kg. Se concluyó que el cacao producido en estos países de la región del OIRSA no representa riesgo para la salud al usarse como materia prima para la producción de alimentos de consumo humano. Sin embargo, una evaluación realizada en la región de Santa Bárbara del Zulia en Venezuela (Lanza et al., 2017), mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), durante el periodo de recolección 2012-2013, determinó presencia de cadmio en grano entre 0,95 y 2,09 mg/kg. 2. También Argüello et al., (2019) desarrolló una investigación en la que se encontró que la concentración de Cd en almendras de cacao en la región Tumbes (Perú), se ubica en un rango promedio de 0,80 a 3,14 mg/kg, por encima del permitido. Estos estudios reafirman la necesidad de realizar estudios a las diferentes partes de las plantas de cacao para constatar niveles de toxicidad y los consecuentes impactos ambientales.



Impactos ambientales en el suelo y agua.

Como lo exponen García et al. (2012); Martínez et al. (2013) y (Macano-Herrera, 2000), una de las vías de incorporación del cadmio a los suelos agrícolas es la fertilización fosfática. Las rocas fosfóricas, que son la materia prima de todos los fertilizantes fosfáticos, contienen niveles de metales pesados que varían según su origen geográfico, pero que generalmente son superiores al promedio de la corteza terrestre. Los metales permanecen en una proporción importante en los fertilizantes industriales y posteriormente son aplicados al suelo junto con el fósforo. Convirtiendo a los fertilizantes en fuente principal de contaminación 50% de la entrada total de Cd en los suelos (De Meeûs et al., 2002). Entre los fertilizantes fosfatados más usados están: Fosfato diamónico (DAP) $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, Fosfato monoamónico (MAP), $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, Fosfato dipotásico (DKP) K_2HPO_4 , Superfosfato de calcio triple $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (Castellanos et al., 2005).

El nivel promedio de cadmio en suelos ha sido ubicado entre 0,07 y 1,1 mg/kg, con un nivel base natural que no excedería de 0,5 mg/Kg (Kabata-Pendias, 2010). Este metal en los suelos posee un tiempo aproximado de permanencia de 300 a 900 años, desafortunadamente, el 90 % no se inmoviliza en el suelo, (Martínez et al, 2013; Rodríguez, 2017; Ramírez, 2002). Además, puede encontrarse en distintas formas químicas y asociado a otros componentes. Otra fuente ambiental de exposición al Cd puede ocurrir especialmente en áreas cercanas a fábricas o minas (Järup y Åkesson, 2009; ATSDR, 2012). Algunos suelos pueden tener niveles de cadmio elevados porque las rocas de las que se formaron tenían el elemento en su composición. Estas relaciones con las otras partículas del suelo son las que, finalmente, van a determinar la biodisponibilidad del cadmio y, por tanto, sus efectos tóxicos. (Pérez, 2020).

En suelos agrícolas existe incremento de cadmio, dando lugar a la preocupación ambiental, a causa de su movilidad y fácil absorción por las plantas (Bravo et al., 2021). El tipo de suelo tiene importante influencia en la disponibilidad y absorción del cadmio por la planta de cacao (*Theobroma cacao* L.), en particular el pH, el % de arcilla y la cantidad de Mg^{2+} y Zn presente en el suelo (Florida et al., 2018). En referencia a esto Peláez et al., (2016) presenta a la especie *Brachiaria*, especialmente *humidicola* y *decumbens* como una planta bioacumuladora de Cd y Pb sobre todo en sus sistemas radicales, las que se muestran como tolerantes a estos ambientes metalíferos, presentando altos contenidos en sus estructuras vegetales, principalmente en las raíces.

La acumulación del cadmio deteriora la calidad del suelo al alterar sus propiedades químicas (los nutrientes y pH), físicas (textura, permeabilidad, retención de agua y densidad) y biológicas (hongos y bacterias) (Barrio, 2016). Su disponibilidad en el suelo depende de factores físicos como el estado del metal, la temperatura y la materia orgánica; y factores químicos como la solubilidad, el pH y el potencial redox (Robledo-Vélez y Castaño-Puerta, 2012). Con la pérdida de propiedades del suelo, también se pierde la capacidad de autodepuración en sus horizontes más superficiales (Barrio, 2016).

En varios estudios en suelos de cultivo de cacao en América Latina y el Caribe existen concentraciones significativamente mayores de cadmio en la capa superior en comparación con otras capas, y una disminución general con la profundidad (Barraza et al. 2017; Gramlich et al., 2017; Arévalo et al., 2016; Chávez et al., 2015; Rodríguez et al., 2019) y esto se debe quizás a la ubicación geográfica y contenido de materia orgánica, de esta especie en zonas tropicales y áreas húmedas, donde es mayor la probabilidad que se genere migración de cadmio en el perfil del suelo que su acumulación en la capa superior (Kabata-Pendias 2010). En Ecuador también se muestrearon y analizaron suelos de terrenos agrícolas de seis organizaciones que conforman la



asociación Unión de Organizaciones Campesinas Cacaoteras (UNOCACE), observó que las concentraciones más altas de cadmio estaban en las muestras en rango de profundidades más superficial (0-20 y 20-40 cm), lo que hace presumir que el metal se encuentra asociado a la materia orgánica. Jaramillo et al., (2019).

Por otra parte, el Cd presenta características hidroquímicas específicas, provocando su potencial movilidad en las aguas subterráneas. A un pH casi neutro (<6,5) permanece en solución, en contraste con la fijación típica de otros metales pesados (Kubier et al., 2019), mientras mayor sea el pH del suelo, mayor será la retención del cadmio. Hay varias razones para ello, entre ellas la formación de especies con menor densidad de carga negativa por la unión del ion metálico con los iones OH⁻ y el incremento de las cargas negativas en la superficie de óxidos o de otros materiales de carga variable donde el ion metálico puede adsorberse (Macano-Herrera, 2000).

El cadmio se encuentra generalmente hasta 5 µg/L en el agua del suelo (Smolders y Mertens, 2013) y hasta 1µg/L en el agua subterránea (Naseem et al., 2014). En estudio realizado en las aguas subterráneas de Pakistán, las concentraciones medias de Cd de 10 µg / L se originaron en rocas sedimentarias que contienen sulfuros del Jurásico (Naseem et al., 2014). En Alemania, las concentraciones de fondo de Cd en las aguas subterráneas oscilan entre 0,11 µg / L, en los acuíferos debajo de las tierras cultivables y 2,7 µg / L, en los acuíferos arenosos debajo de las tierras boscosas (Duijnsveld et al., 2008). Lo que indica una relación entre el tipo de roca, el medio del agua subterránea y las concentraciones de Cd.

Se considera que un grano cultivado en un suelo enriquecido con un nivel de 1 mg de Cd por 1 kg de suelo (1 ppm) podría tener un contenido superior de dicho elemento porque la planta acumula este metal en el tiempo de establecimiento del cultivo.

Impactos ambientales en la salud humana.

El cadmio es relativamente escaso, sin embargo, es uno de los metales pesados con mayor toxicidad. Según el registro de enfermedades y venenos de EE. UU. (Priority List of Hazardous Substances, 2017, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, se encuentra en la séptima posición de los elementos más tóxicos para la salud humana (Al-Ghafari, et al., 2019). Entre los problemas del cultivo de cacao, se encuentra la capacidad inherente de fitoacumular cadmio, y al ser calificado como un contaminante metálico, genera deterioro paulatino de la salud humana (AbuShady et al., 2017; Antoine et al., 2017; Shakir et al, 2017), vegetales y animales Aguirre-Forero et al., 2020) y ecosistemas (Quero-Jiménez et al., 2017; Marbán et al., 1999). Es un elemento teratogénico (genera defectos congénitos en los fetos) y carcinogénico. La ingesta continuada de este metal pesado puede provocar fragilidad ósea. (Pérez, 2020). Una posible fuente de contaminación por cadmio en humanos es la ingesta de plantas contaminadas por el metal (Rodríguez et al., 2008). En el organismo, el Cd puede tener un tiempo de residencia por un periodo de 10 - 30 años, por lo que su excreción es lenta. Sin embargo, la exposición continua a este elemento causa efectos negativos a la salud de la persona, principalmente en los riñones, hígado, pulmón, sistema óseo y testículos; además de contribuir en el desarrollo de enfermedades degenerativas y diferentes tipos de cáncer (Rodríguez, 2017) y (Nawrot et al., 2006).

La Autoridad Europea en Seguridad Alimentaria (EFSA), indicaban en 2012 que los europeos ingerían un 35 % más del valor máximo de cadmio recomendado (2,5 µg/kg de peso), aunque en ciertas regiones esa cifra puede multiplicarse por cuatro. Esto se produce, principalmente, por la ingesta de alimentos cultivados en suelos contaminados por cadmio, siendo los cereales el cultivo que más aporta en la dieta (26,9 %), aunque también pueden provenir de vegetales, raíces, tubérculos. Además, puede encontrarse en otros alimentos en una menor proporción que en



productos agrícolas, como pueden ser el chocolate (4,3 %) o los moluscos (3,2 %) (Pérez, 2020) y (Sirot et al., 2008; Nava-Ruiz & Méndez-Armenta, 2020).

Se conoce que en algunos países que pertenecen a Europa y Norte América la ingesta diaria de cadmio varía entre 10 y 40 $\mu\text{g}/\text{día}$, y en personal dedicado a las actividades industriales los valores de la concentración de cadmio pueden ser superior a 50 $\mu\text{g}/\text{L}$.; varios estudios refieren que las concentraciones de cadmio en la sangre para personas no fumadores varían entre 0,4 a 1,0 $\mu\text{g}/\text{L}$, y en el caso de fumadores los valores varían entre 1,4 a 4 $\mu\text{g}/\text{L}$ (Navarro et. al, 2007).

Conflictos socioeconómicos

La demanda de cacao está creciendo significativamente, pero la presencia de cadmio (Cd), es un problema potencial que limita su comercialización (Aguirre-Forero et al., 2020), ya que las autoridades europeas han establecido regulaciones a la importación de los derivados del cacao con la fijación de niveles de concentración máximos permitidos de cadmio kg (Furcal & Torres, 2020). La Comisión Técnica Científica de Contaminantes de la Cadena Alimentaria (CONTAM) de la EFSA (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria), determinó que “La exposición alimentaria media al cadmio (Cd) en los países europeos se acerca o supera ligeramente la ingesta semanal tolerable de 2,5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de peso corporal” y, en algunos subgrupos de la población, llega casi a duplicarse, (Diario Oficial de la Unión Europea, 2014), lo que confirma Florida, (2021), al detallar que esta situación motivó a la comunidad científica a realizar investigaciones sobre su bioacumulación en granos, los potenciales riesgos a la salud, calidad, y sus posibilidades de exportación.

La Unión Europea aprobó la nueva reglamentación sobre límites máximos de cadmio en cacao y chocolate, Reglamento UE de la Comisión No. 488/2014, que modifica el Reglamento CE No. 1881/2006 y fija que a partir del 1 de enero del 2019 entre en rigor para la UE, la norma que considera como contenido máximo de cadmio en diversos productos de cacao en un rango de 0.10 a 0.80 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Jiménez, 2015). Situación de preocupación para los países de América Latina y el Caribe, debido a que la Unión Europea, es el principal destino de las exportaciones de cacao en grano de algunos países. Perú, por ejemplo, ha fijado los límites máximos de Cd en cacao y chocolate en un rango de 0,10 a 0,80 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Meter et al., 2019). En Latinoamérica, especialmente en Colombia, el consumo de chocolate es muy bajo; por lo tanto, el riesgo de exposición de cadmio por estos productos también puede serlo. Sin embargo, Uruguay que es el mayor consumidor, tiene un nivel de cadmio para todos los alimentos en general, sin importar el grado de exposición de los consumidores por consumo de chocolate (Jiménez, 2015).

En investigación realizada en el Ecuador se ha demostrado contaminación por metales pesados en el chocolate en polvo comercializado en la ciudad de Guayaquil. Se analizaron por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito tres marcas de chocolate más populares. El plomo no fue detectable en el chocolate; el As se encontró en bajos niveles en la Marca 1 y 3, y, por el contrario, se halló cadmio en todas las marcas de chocolate, con concentraciones de $0,236 \pm 0,082 \text{ mg}/\text{kg}$ en la Marca-1; $0,169 \pm 0,066 \text{ mg}/\text{kg}$ en la Marca-2 y la Marca-3 superó el límite máximo permisible de 0.600 mg/kg según normativa europea con $1,440 \pm 0,212 \text{ mg}/\text{kg}$, representando un riesgo para los consumidores (Sánchez et al., 2021).

Se ha descrito en numerosos trabajos que la semilla de cacao en Ecuador contiene metales pesados. Carrillo, (2003) reporto en fincas donde se establecía cacao en Santa Rosa en la provincia de El Oro y Naranjal provincia de Guayas, cantidades mayores a 1 mg kg^{-1} de Cd. Carrillo, (2003) refiere que en el Litoral Ecuatoriano los suelos presentan cantidades de cadmio en forma total biodisponible que superan lo permitido por el Codex alimentarius. INIAP - PROMSA (2003)



indica la presencia de Cd en nivel tóxico en un suelo cacaotero de El Oro y almendras de cacao en cantidad superior a 1 mg kg^{-1} , en Guayas, Zamora y El Oro, Los Ríos, Francisco de Orellana, Esmeraldas y parte tropical de Pichincha, lo que conlleva a minimizar la calidad de cacao, siendo reconocidas como fuentes posibles de contaminación, la quema de fundas plásticas en cercanía a las carreteras y uso de agua que provienen de minas.

Según Mite et al., (2010), las concentraciones máximas encontradas en las almendras de cacao supera los 2.000 mg/kg de Cd en las provincias de El Oro, Guayas, Manabí, Orellana, Napo y Zamora Chinchipe. Según estos autores, El Oro presenta los valores más altos de cadmio en cacao (4.080 mg/kg de Cd), seguido por Guayas y Manabí con 3.570 y 3.460 mg/kg , respectivamente. En otros estudios más recientes se ha demostrado que en el sur de Ecuador, los granos de cacao mostraron un promedio de 0.940 mg/kg de Cd y el 66% de las muestras excedieron el umbral de 0.600 mg/kg propuesto por la Unión Europea (Chávez et al., 2015). Así mismo, en otra investigación analizaron el cacao en seis provincias de Ecuador y presentaron un promedio de cadmio de 0.970 mg/kg (Barraza et al., 2017). En el mismo sentido, Argüello et al., (2019) analizaron 254 muestras de cacao ecuatoriano y hallaron niveles de Cd de 0.030 a 10.400 mg/kg con una media geométrica de 0.550 mg/kg y una media aritmética de 0.900 mg/kg de Cd, donde el 45% de las muestras superaron el límite permisible. Se ha sugerido que la contaminación del cacao se debe al Cd presente en el suelo de manera natural por la actividad volcánica, al uso de fertilizantes y al agua para riego contaminada con este metal pesado (Chávez et al., 2015; Chávez et al., 2016; Barraza et al., 2017; Kruszewski et al., 2018; Furcal & Torres, 2020; Argüello et al., 2019).

En 2017 y 2018, se determinó la presencia de cadmio en la raíz y hoja del árbol de cacao, y en el grano. La información generada permitió determinar que parte de la producción de cacao se encuentra localizada en un entorno donde los órganos raíz y hoja pueden bioacumular este metal y transferirlo a la mazorca donde se detectó concentraciones de cadmio en granos, en un rango de 0 a $8,70 \text{ mg/kg}$ (Furcal & Torres, 2020).

Barrezueta et al. (2019) detalló el contenido de Cd en hojas, almendra y testa de cacao, con análisis en un espectrofotómetro. De 27 muestras analizadas por triplicado para hojas, almendra y testa, fueron positivo para Cd el 55%, 89% y 100% respectivamente. Los niveles de Cd en promedio fueron: $1,18 \text{ mg kg}^{-1}$ (hojas), $1,43 \text{ mg kg}^{-1}$ (almendra) y $3,09 \text{ mg kg}^{-1}$ (testa). Con la prueba LSD de Fischer ($p < 0,05$), se determinó significancia en las hojas por tipo de cacao (CCN51, $2,88 \text{ mg kg}^{-1}$; Nacional, $0,68 \text{ mg kg}^{-1}$). Los niveles de Cd por almendra y testa, también mostraron significancia ($p < 0,05$) entre los sitios, obteniendo el mayor pico de Cd en Rio Bonito con $1,93 \text{ mg kg}^{-1}$ (almendra) y $4,00 \text{ mg kg}^{-1}$ (testa). Todos los promedios sobrepasaron el umbral establecido por la comunidad europea de $0,6 \text{ mg Cd kg}^{-1}$. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos por otros investigadores para hojas y almendra, pero analizadas las muestras en un ICP, pero muy altas para el análisis de la testa, detectando en este tejido el mayor valor de Cd ($6,38 \text{ mg kg}^{-1}$).

Por otra parte, Florida (2021) evidencia altos niveles en diferentes regiones de los principales países productores Latinoamericanos (LA): Brasil, Ecuador, Colombia, Perú, República Dominicana, Bolivia, Honduras, y otros.

Discusión

Para el mundo, América Latina y el Caribe (ALC), el cacao es un cultivo tradicional de importancia, social, económica y ambiental que presenta oportunidad para el desarrollo de los involucrados en su proceso productivo y de comercio con una producción mantenida desde el 2006

(FAO, 2018) y, por tanto, para la oferta de sus productos, en especial de su grano para la exportación.

Entre los problemas ambientales para el cultivo de cacao se encuentra la capacidad de fitoacumular cadmio, metal que genera deterioro paulatino de la salud humana (AbuShady et al., 2017; Antoine et al., 2017; Shakir et al., 2017), vegetales y animales Aguirre-Forero et al., 2020) y ecosistemas (Quero-Jiménez et al., 2017; Marbán et al., 1999). Este se encuentra en la séptima posición de los elementos más tóxicos para la salud humana y una persistencia en el organismo de 10 - 30 años. (Al-Ghafari, et al., 2019). Por tanto, el consumo de productos de cacao con altas “trazas o cantidades mínimas” durante la niñez, impide el desarrollo apropiado del cerebro; debido a una baja capacidad de excreción produce daños renales, efectos negativos al hígado, pulmón, sistema óseo y testículos; además de contribuir en el desarrollo de enfermedades degenerativas y diferentes tipos de cáncer (Rodríguez, 2017); (Nawrot et al., 2006) y (Maddela et al., 2020). Por su parte en las plantas un exceso de cadmio inhibe los procesos fisiológicos de las plantas lo que provoca alteración de la tasa fotosintética, anomalías en las estructuras florales, malformaciones en los embriones de las semillas cambios en el número de granos en la almendra; Adicionalmente provoca un desbalance nutricional importante en las plantas, lo que tiene efectos considerables sobre el crecimiento y su productividad. (Pérez, 2020); (Huang et al., 2014 y Jinadasa et al., 2016); (Hédiji et al., 2015).

Se establece también que la principal causa de contaminación de los suelos por cadmio, es la actividad agrícola, (Pérez, 2020) aunque la actividad antropogénica puede provocar aumento en la cantidad y/o en su disponibilidad. Algo relevante de exponer es su tiempo de permanencia de 300 a 900 años, desafortunadamente, el 90 % no se inmoviliza en el suelo, (Martínez et al., 2013; Rodríguez, 2017; Ramírez, 2002). Ya en el suelo el cadmio deteriora su calidad con efectos negativos en sus propiedades químicas (los nutrientes y pH), físicas (textura, permeabilidad, retención de agua y densidad) y biológicas (hongos y bacterias) (Barrio, 2016). La pérdida de estas propiedades hace que disminuya y/o pierda la capacidad de autodepuración. (Barrio, 2016). La presencia de cadmio en el suelo depende también de factores físicos como el estado del metal, la temperatura y la materia orgánica; (Robledo-Vélez y Castaño-Puerta, 2012). La materia orgánica facilita la disponibilidad del cadmio en el suelo (Robledo-Vélez y Castaño-Puerta, 2012), y al encontrarse esta especie ubicada geográficamente en zonas tropicales y áreas húmedas (Kabata-Pendias 2010), facilita el contenido de materia orgánica, lo que hace, que exista la mayor probabilidad que se genere migración de cadmio en el perfil del suelo y su acumulación en la capa superior; se suma a esto la necesidad de la especie a la sombra desde el momento del trasplante hasta que desarrolla (Quiroz y Mestanza, 2012). Se analiza asimismo que cultivos viejos de cacao pueden absorber más Cd que cultivos jóvenes, porque la planta acumula este metal en el tiempo de establecimiento del cultivo, sin dejar de considerar también el material genético de cacao y su relación con el suelo y las prácticas de manejo agrícola de cada finca (Bravo et al., 2021).

La presencia de cadmio (Cd) es un problema potencial que limita su comercialización (Aguirre-Forero et al., 2020, especialmente su exportación pues el cacao puede absorber el cadmio (Cd) presente en el suelo y posteriormente acumularlo en sus almendras, considerando que las autoridades europeas han establecido regulaciones a la importación de los derivados del cacao con la fijación de niveles de concentración máximos permitidos de cadmio kg (Furcal & Torres, 2020).



La norma considera como contenido máximo de cadmio en diversos productos de cacao en un rango de 0.10 a 0.80 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Jiménez, 2015). Sin embargo, estas regulaciones no estipulan límites máximos en cacao sin procesar; en ausencia de este, las investigaciones han clasificado estos límites, tomando como referencia los límites para cacao procesado, generando confusión en la comunidad científica y sobredimensionada. preocupación al sector cacaotero. En varias investigaciones se ha determinado que la sucesión de acumulación de este elemento en los tejidos de cacao se da en el siguiente orden: raíz, tallo, hojas, cáscara o testa y grano de cacao, (Mite et al., 2010) y (Chan y Hale, 2004), lo que quiere decir que el grano de cacao contiene el menor porcentaje de cadmio respecto a los demás tejidos de la planta. Sin embargo, existe la preocupación para los países de América Latina y el Caribe, debido a que la Unión Europea, es el principal destino de las exportaciones de cacao en grano de algunos países. (Meter et al., 2019), con los correspondientes efectos negativos para los países que presentan altos niveles de contaminación (disponible en el suelo por diferentes actividades). Pero algo que se debe tener presente es que esta problemática social, económica y ambiental representan un desafío para custodiar la competitividad del comercio de exportación en el cultivo de cacao y la necesidad de promover estrategias para resolver esta situación que limita el desarrollo de la cadena de valor de esta especie tradicional de importancia.

Conclusiones

A partir de lo anteriormente investigado podemos determinar las siguientes conclusiones:

1. A nivel global y local se identifica la presencia del cadmio en plantas de cacao que supone un problema no sólo medioambiental (agua-suelo), sino que también presume un factor más en la degradación de los suelos y, por tanto, una amenaza para la producción agrícola y la seguridad alimentaria.
2. Se registra al cadmio como uno de los metales más tóxicos e inhibitorios de los procesos fisiológicos de las plantas, por su alta biodisponibilidad y admite un riesgo real e importante para la conservación del estado de salud de la humanidad.
3. La presencia de cadmio (Cd) es un problema potencial que limita su comercialización y posibilidades de exportación. América Latina, en especial Ecuador, se ve particularmente afectada por los preocupantes niveles de cadmio en los granos de cacao.
4. La regulación del cadmio por la Unión Europea, tiene efectos negativos económicos que representan un reto para cuidar la competitividad del comercio internacional en el cultivo de cacao y la necesidad de promover estrategias para resolver esta situación para el desarrollo de la cadena de valor de esta especie de importancia social y económica.

Bibliografía

1. AbuShady, M., Fathy, H., Fathy, G., A., Abd El Fatah, S., Ali, A., & Abbas, M. (2017). "Blood lead levels in a group of children: the potential risk factors and health problems." *Journal de Pediatría*, 93(6), 619–624
2. Acebo, M., Rodríguez, A., y Quijano, J., (2016). Estudios Industriales, Orientación estratégica para la toma de decisión. Industria de cacao. Escuela Superior Politécnica del Litoral ESPOL. <http://www.espae.espol.edu.ec/wp-content/uploads/2016/03/industriaconstruccion.pdf>

3. Aguirre-Forero, S.; Piraneque-Gambasica, N.V. & Vásquez-Polo, J.R. (2020). Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: emphasis in cadmium*. *Entramado*, 16(2), 298–310. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.6753>
4. Aikpokpodion, P. (2010). Nutrients Dynamics in Cocoa Soils, leaf and beans in Onto State, Nigeria. *J. Agri. Sci.* 1(1):1- 9.
5. Al-Ghafari, A., Elmorsy, E., Fikry, E., Alrowaili, M., Carter, W.G. (2019). The heavy metals lead and cadmium are cytotoxic to human bone osteoblasts via induction of redox stress. *PLoS One* 14, 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225341>
6. Antoine, J., Hoo Fung, L., & Grant, CH. (2017). Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. *Toxicology Reports*, 4, 181–187.
7. Antolinez, Y., Almanza, P., Baraona, F., Polanco, E., Serrano, P. (2020). Estado actual de la cacaocultura: una revisión de sus principales limitantes *Ciencia y Agricultura*, vol. 17, núm. 2, Mayo Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Colombia DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n2.2020.10729>
8. Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Heavy metals in soils of cocoa plantations (*Theobroma cacao* L) in three regions of Peru. *Ecología Aplicada*, 15(2)
9. Argüello, D., Chavez, E., Laurysen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment*, 649, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292>
10. ATSDR. Agencia para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades. Servicio de Salud Pública Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos; Atlanta, GA, EE.UU.: (2012). Perfil toxicológico del cadmio; págs. 1-487.
11. Barraza, F, Schreck, E., Leveque, 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. *Environmental Pollution Journal*, 229, 950–963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.080>
12. Barrezueta, S.; Chabla, J. & Cervantes, A. (2019, November 21). NIVELES DE CADMIO EN CACAO: CASO CACAOTERAS DE LA ZONA SHUMIRAL Y RÍO BONITO, ECUADOR. ResearchGate; unknown. https://www.researchgate.net/publication/338374842_NIVELES_DE_CADMIO_EN_CACAO_CASO_CACAOTERAS_DE_LA_ZONA_SHUMIRAL_Y_RIO_BONITO_ECUADOR
13. Barrio, N. (2016). Metales pesados en suelos y sus efectos en la salud. España. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/55568/>
14. Bingham, F.T.; Page, A.L.; Mahler, R.J. and Ganje, T.J. (1975). Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 4 (2):207-211.
15. Bravo, D., León-Moreno, C., Quiroga, R., Moreno, E., Duarte, D., Zamora, A., Gutiérrez, E., Aristizábal, A., Arroyave, C., Cardona, L., Guerra, B., Olarte, H., Cuervo, C., & Orozco, M. L. (2021). ¿Qué es el cadmio y por qué es importante en el cultivo de

- cacao? Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404548>
16. Bravo, D., León-Moreno, C., Quiroga, R., Moreno, E., Zamora, A., Gutiérrez, E., Aristizábal, A., Arroyave, C., Cardona, L., Guerra, B., Olarte, H., Cuervo, C., Orozco, M. L., & Duarte, D. (2021). Investigación y recomendaciones sobre cadmio en el cultivo de cacao en Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404562>
 17. Carrillo, M. D. (2003). Caracterização das formas de metais pesados, sua biodisponibilidade e suas dinâmicas de adsorção e de mobilidade em solos do Equador. Departamento de Solos (Doctoral dissertation, Tese de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, MG–Brasil).
 18. Castellanos, J. Z.; Cueto, W. J. A.; Macías, C. J.; Salinas, G. J. R.; Tapia, V. L. M.; Cortés, J. J. M.; González, A. I. J.; Mata, V. H.; Mora, G. M.; Vasquez, H. A.; Valenzuela, S. C.; Enríquez, R. S. A. (2005). La Fertilización en los Cultivos de Maíz, Sorgo y Trigo en México. INIFAP. Guanajuato, México. 44 p.
 19. Chan, D., & Hale, B. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*. 55: 2571-2579
 20. Chávez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., & Baligar, V. C. (2015). Análisis de la Problemática de Cadmio en el cultivo de cacao del Ecuador. Análisis de la Problemática de Cadmio en el cultivo de cacao del Ecuador. Doi: https://www.researchgate.net/publication/304346536_Analisis_de_la_Problematica_de_Cadmio_en_el_cultivo_de_cacao_del_Ecuador
 21. Chávez, E., He, Z. L., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., & Baligar, V. C. (2016). Chemical speciation of cadmium: An approach to evaluate plant-available cadmium in Ecuadorian soils under cacao production. *Chemosphere*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.013>.
 22. Charrupi, N; Martínez, D. (2017). Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño (en línea). Bogotá - Colombia, Universidad de La Salle - Ciencia Unisalle. 132 p. Consultado 6 mar. 2021. Disponible en https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1717&context=ing_ambient_al_sanitaria.
 23. Clemens, S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochemie*. 88: 1707-1719.
 24. Clemens, S; Palmgreen, M; Krämer, U. (2002). A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science*. 7: 309-315.
 25. DalCorso, G.; Manara, A. and Furini, A. (2013). An overview of heavy metal challenge in plants: From roots to shoots. *Metallomics*, 5:1117-1132
 26. De Meeûs., Eduljee G.H., Hutton M. (2002). Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. I. *Science of the Total Environment*. 291 (1-3): 167-187.
 27. Diario Oficial de la Unión Europea. (2014). Reglamento (UE) No 488/2014 de la Comisión del 12 de mayo de 2014 que modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 por lo que

- respecta al contenido máximo de cadmio en los productos alimenticios. Diario Oficial de la Unión Europea. 13 de mayo de 2014. L138/75-79.
28. Duijnsveld WHM, Godbersen L, Dilling J, Gäbler H-E, Utermann J, Klump G, Scheeder G. (2008). Ermittlung flächenrepräsentativer Hintergrundkonzentrationen prioritärer Schadstoffe im Bodensickerwasser Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hanover, pp. 163
 29. Encinas, M. (2011). Medio ambiente y contaminación: principios básicos. (Attribution NonCommercial-NoDerivatives 4.0. International, Ed.)(1ª Edición)
 30. FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). FAOSTAT. Recuperado de: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>
 31. Florida Rofner, N. (2021). Revisión sobre límites máximos de cadmio en cacao (*Theobroma cacao* L.). *La Granja*, 34(2), 117–130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.08>
 32. Florida Rofner, N., Claudio Melchor, S. L., & Gómez Bernal, R. (2018). El pH Y La Absorción De Cadmio En Almendras De Cacao Orgánico (*Theobroma cacao* L.) EN LEONCIO PRADO, HUÁNUCO, PERU. *Folia Amazónica*, 27(1), 1–8. <https://doi.org/10.24841/fa.v27i1.438>
 33. Fountain, A. y Adams F. (2020). Barómetro del Cacao. <https://voicenetwork.cc/wp-content/uploads/2021/04/2020-Baro%cc%81metro-del-Cacao-ES.pdf>
 34. Furcal, P. & Torres, J. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 33(1), 122–137. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/263/2631042011/html/>
 35. García, E; García, E; Juárez, LF; Juárez, L; Montiel, JM; Gómez, MA. (2012). La respuesta de haba (*Vicia faba*, L.) cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 28(2):119–126.
 36. Gimeno-García E, Andreu V, Boluda R. (1996). Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environ Pollut.* 92(1):19–25. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0269749195000909>
 37. Gramlich, A., Tandy, S., Andres, C., Paniagua, J. C., Armengot, L., Schneider, M., & Schulin, R. (2017). Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management. *Science of The Total Environment*, 580, 677–68
 38. Gramlich, A., Tandy, S., Gauggel, C., López, M., Perla, D., González, V. & Schulin, R. (2018). Soil Cadmium Uptake by Cocoa in Honduras. *Science of the Total Environment*, 612, 370-378. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.145>.
 39. Hédiji, H., Djebali, W., Belkadhi, A., Cabasson, C., Moing, A., Rolin, D., Brouquisse, R., Gallusci, P., & Chaïbi, W. (2015). Impact of long-term cadmium exposure on mineral content of *Solanum lycopersicum* plants: Consequences on fruit production. *South African Journal of Botany*, 97, 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.010>
 40. Hernández-Baranda, Yenisei, Rodríguez-Hernández, Pedro, Peña-Icart, Mirella, Meriño-Hernández, Yanitza, & Cartaya-Rubio, Omar. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), e10. Epub 01 de septiembre de 2019. Recuperado en 17 de octubre de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es.

41. Huamanchumo, O. (2017). Cacao. Producción, consumo y comercio. Del período prehispánico a la actualidad en América Latina. Laura Caso Barrera, coordinadora Madrid; Frankfurt am Main: Iberoamericana; Vervuert, Colección Tiempo Emulado. Historia de América y España 48 2016 | ISBN 9788484899242 | 408 pp. Fronteras de La Historia, 22(1), 237–242. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83350361010>
42. Huaraca, N., Pérez, L., Bustinza, S., Pampa, B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. Información tecnológica, 31(4), 139-152. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
43. INEC. (2021). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2020. Ecuador. Doi: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Presentacion%20ESPAC%202020.pdf
44. INIAP - PROMSA. (2003). Determinación de metales contaminantes en cultivos de exportación y su repercusión sobre la calidad de los mismos. Informe Técnico 2003. Dpto. Suelos. Quevedo, Los Ríos, Ecuador. 60 p.
45. Intriago, F., Talledo, S. M., Cuenca, N. G., Macías, B. J., Álvarez, A. J. & Menjívar, F. J. (2019). Evaluación del contenido de metales pesados en almendras de cacao (*Theobroma cacao* L.) durante el proceso de beneficiado. Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación, 3(26), 17-23.
46. Irfan, M.; Hayat, S.; Ahmad, A. and Alyemeni, M.N. (2013). Soil cadmium enrichment: Allocations and plant physiological manifestations. Saudi Journal of Biological Sciences, 20 (1):1-10.
47. Jaramillo R, Medina K, Recalde A, Pastás K, Bedoya D, Ramírez V. Evaluación del contenido de cadmio en suelos destinados al cultivo de cacao en la provincia de Guayas (Ecuador). revista [Internet]. 18 de noviembre de 2019 [citado 17 de octubre de 2021];1(1). Vol. 1 Núm. 1 (2015): ECUADOR ES CALIDAD - Revista Científica Ecuador es Calidad Disponible en: <https://revistaecuadorestcalidad.agrocalidad.gob.ec/revistaecuadorestcalidad/index.php/revista/article/view/73>
48. Järup, L., & Åkesson, A. (2009). Current status of cadmium as an environmental health problem. Toxicology and Applied Pharmacology, 238(3), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.04.020>
49. Jiménez, C. (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. Producción + Limpia, 10(1), 89–104. <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5746910.pdf>
50. Jinadasa, N., Collins, D., Holford, P. et al. Reactions to cadmium stress in a cadmium-tolerant variety of cabbage (*Brassica oleracea* L.): is cadmium tolerance necessarily desirable in food crops?. Environ Sci Pollut Res 23, 5296–5306 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5779-6>
51. Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition. Retrieved from
52. Khan A., Khan S., Khan M. A., Qamar Z. & Wagas M. (2015). The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants on plant nutrients, and associated health risk: a review. Environmental Science Pollution, 22:13772-13799.
53. Kruszewski, B., Obiedziński, M. W., & Kowalska, J. (2018). Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different

- manufacturers. *Journal of Food Composition and Analysis*, 66, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.12.012>
54. Kubier A., Wilkin RT, Pichler T. (2019). Cadmio en suelos y aguas subterráneas: una revisión. *Apl. Geochem.* 2019; 108: 104388. doi: 10.1016 / j.apgeochem.2019.104388.
 55. Lanza, J. G., Churión, P. C., Liendo, N. J., & López, Víctor Hugo. (2016). Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (teobroma cacao l.) de santa bárbara del Zulia, Venezuela. *Saber; Universidad de Oriente.* <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=BR2021X03564>
 56. Lara, J., Tejada, C., Villabona, A., Arrieta, A., & Granados, C. C. (2016). Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista ION*, 29(2), 113-124
 57. Macano Herrera, T. (2000). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. *Venezuelas*, 43.
 58. Maddela, N. R., Kakarla, D., García, L. C., Chakraborty, S., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2020). Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view. *Science of the Total Environment*, 720, 137645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137645>
 59. Marbán, L., Camelo, L., Agostini, R. (1999). Contaminación por metales pesados en un suelo de la cuenca del río econquista . 15-19.
 60. Martínez, K; Souza, V; Bucio, L; Quiroz, LE; Gutiérrez, MC. (2013). Cadmio: efectos sobre la salud. Respuesta celular y molecular. *Acta Toxicológica Argentina* 21:33–49.
 61. Mendoza, K., Mostacero, J., López, S., Gil, A., De la cruz, J., Villena, L. (2021). Cadmium in *Theobroma cacao* L. “cacao” plantations in the San Martín region (Lamas), Peru. *Manglar* 18(2): 169-173, 2021
 62. Meter, A., Atkinson, R. J., & Laliberte, B. (2019). Cadmio en el cacao de América Latina y el Caribe -Análisis de la investigación y soluciones potenciales para la mitigación. *Biodiversity International*. Roma, 74 pp
 63. Mite, F., Carrillo, M., & Durango, W. (2010). Avances del monitoreo de Presencia de cadmio en almendras de cacao, suelo y agua en Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo XII Congreso Ecuatoriano de La Ciencia Del Suelo, 17–19.
 64. Naseem, S., Hamza, S., Nawaz-ul-Huda, S., Bashir, E., & ul-Haq, Q. (2013). Geochemistry of Cd in groundwater of Winder, Balochistan and suspected health problems. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1683–1690. doi:10.1007/s12665-013-2572-z
 65. Navarro-Aviñó, J.P., Aguilar Alonso, I. & López-Moya, J.R., (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 16(2), pp.10–25.
 66. Nava-Ruiz, C. & Méndez-Armenta, M. (2020). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, 16(3), 140–147. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=32546>
 67. Nawrot T, Plusquin M, Hogervorst J, Roels HA, Celis H, Thijs L, et al. Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: a prospective population-based study. *Lancet Oncol* [Internet]. (2006) Feb [cited 2018 Jan 10];7(2):119–26. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470204506705459>

68. Nieves, Y., Parra, N., Villanueva, S., Henríquez, M. (2019). Tech note: bioremediation, enemy of cadmium. *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 26, núm. 1, pp. 96-104, 2019. Doi: https://www.redalyc.org/journal/707/70758484010/html/#redalyc_70758484010_ref11.
69. Ogata N. (2007). Cacao. *Biodiversitas* 72:1-5. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
70. Ogawa, T., Kobayashi, E., Okubo, Y., Suwazono, Y., Kido, T., & Nogawa, K. (2004). Relationship among prevalence of patients with Itai-itai disease, prevalence of abnormal urinary findings, and cadmium concentrations in rice of individual hamlets in the Jinzu River basin, Toyama prefecture of Japan. *International Journal of Environmental Health Research*, 14(4), 243–252. doi:10.1080/096031204100017255
71. OIRSA. (2020). Determinación de niveles de cadmio en almendras de cacao (*Theobroma cacao*), en Centro América y República Dominicana. Doi: https://www.oirsa.org/contenido/2020/Determinaci%C3%B3n%20niveles%20de%20cadmio%20en%20cacao%2010_7_20.pdf
72. Pedro César Quero-Jiménez, Margie Zorrilla Velazco, Sergio Morales Fernández, & Miriela Rodríguez Pequeño. (2017). DETERMINACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS ALEDAÑOS A LA EMPRESA ELECTROQUÍMICA DE SAGUA. *Revista Centro Azúcar*, 44(3), 10–10. http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/110
73. Peláez, J., Bustamante, J., & Gómez, D. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena Medio colombiano. *Revista Luna Azul (on Line)*, 43, 82–101. <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/3433>
74. Pérez, J. (2020). La degradación de los suelos: contaminación por cadmio. *Ciencia y Tecnología*. <https://www.revistalacomuna.com/ciencia-y-tecnologia/la-degradacion-de-los-suelos-contaminacion-por-cadmio/>
75. Pérez Moncada, U. A., Ramírez Gómez, M. M., Serralde Ordoñez, D. P., Peñaranda Rolón, A. M., Wilches Ortiz, W. A., Ramírez, L., & Rengifo Estrada, G. A. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 37(2), 121. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
76. Pérez, P. & Azcona, M. (2012). *Rev Esp Méd Quir Volumen 17, Núm. 3, julio-septiembre. Rev Esp Méd Quir*, 17(3), 199–205. <https://www.medigraphic.com/pdfs/quirurgicas/rmq-2012/rmq123i.pdf>
77. Quiroz, J., Mestanza, M. (2012). ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DE UNA PLANTACIÓN DE CACAO. *BOLETÍN TÉCNICO No.146 DOI: http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/12/boletin_146_establecimiento_y_manejo_de_una_plantaci%C3%B3n_de_cacao.pdf*
78. Ramírez A, (2002). Toxicología del cadmio conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores BIOLÓGICOS. ISSN 1025 - 5583 Vol. 63, Nº1 – 2002.
79. Robledo Vélez, L., & Castaño Puerta, A. (2012). Validación de la metodología para el análisis de los metales cadmio y plomo en el agua tratada por absorción atómica con horno de grafito en el laboratorio de análisis de agua y alimentos. 113. Pereira. ¿Obtenido

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/3145/5430858R666.pdf;jsessionid=770848EB6C180602A72B9E4EF7B5800E?sequence=1>

80. Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21(12), 3372
81. Rodríguez, H. S., Darghan, A. E. & Henao, M. C. (2019). Spatial Regression Modeling of Soils with High Cadmium Content in a Cocoa Producing Area of Central Colombia. *Geoderma Regional*, 16. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00214>.
82. Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M.C., del Río, L.A., Sandalio, L.M. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas* 17(3):139-146
83. Sanchez, C., Zambrano, D., Arevalo, O., Macas, V., Pernía, B., García, D., Jimenez, J. (2021). Baseline Study of Heavy Metal Concentrations in Powdered Chocolate Marketed in Guayaquil, Ecuador. Doi: <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/IRR/article/view/574/527>
84. Sánchez, V., Iglesias, C., & Zambrano, J. (2019). Diagnóstico y prospectiva de la cadena de valor del cacao en América Latina y El Caribe.
85. Satarug S. (2019). Fuentes de cadmio y toxicidad. *Tóxicos*. 2019; 7 : 25. doi: 10.3390 / toxics7020025.
86. Shakir, E., Zahraa, Z., & Hameed, A. (2017). Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 95–102
87. Sirot V., Samieri C., Volatier L., Leblanc C. (2008). Ingesta dietética de cadmio y datos de biomarcadores en consumidores franceses de productos del mar. *Expo. Sci. Reinar. Epidemiol.* 2008; 18 : 400–409. doi: 10.1038 / sj.jes.7500615.
88. Smolders E, Mertens J. (2013). Cadmium In: Alloway JB (Ed.), *Heavy Metals in Soils – Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability*, 3 ed. Springer, Dordrecht, pp. 283–299
89. Thomine, S., Wang, R., Ward, J. M., Carwford, N. M. and Schroeder, J. I. (2000). Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to Nramp genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA.* 97: 4991-4996.
90. Wang, S., Wang, Y., Zhang, R., Wang, W., Xu, D., Guo, J., Li, P., Yu, K. (2015). Historical levels of heavy metals reconstructed from sedimentary record in the hejiang river, located in a typical mining region of southern china. *Sci Total Environ*, 532:645 – 654
91. Wasson, S.J., Linak, W.P., Gullett, B.K., King, C.J., Touati, A., Huggins, F.E., Chen, Y., Shah, N. And Huffman, G.P. (2005). Emission of chromium, copper, arsenic and PCDD's/Fs from open burning of CCA-treated wood. *Environmental Science Technology*, 3(5), 2005, p. 8865-8876.

Contribución de los Autores

Autor	Contribución
Chancay Alcívar Luis Fernando	Recopilación, elaboración y diseño de la investigación; revisión bibliográfica, preparación y edición del manuscrito.
María Margarita Delgado Demera	Recopilación, elaboración y diseño de la investigación; revisión bibliográfica, preparación y edición del manuscrito.

Citación/como citar este artículo: