

Análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao¹

Gustavo Alberto Calderón Suárez²
Ciro Eduardo Roza Correa³

Resumen

En la actualidad el cacao de sectores como América Latina y el Caribe son de los más exportados en el mundo. En cantidades normales, la presencia de metales es común en suelo vegetal, en el caso del cadmio y el plomo, son elementos móviles que se encuentra en el suelo y es transportado desde las raíces de las plantas a los tallos, las hojas y los frutos. Sin embargo, en cantidades elevadas, la contaminación para el suelo y la población humana puede ser en extremo perjudicial. Por esta razón, el presente estudio tiene como objetivo analizar la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao en América Latina entre el 2018-2023. Esto se realizó mediante la identificación, caracterización y recuperación de información en bases de datos como Scopus, SpringerLink, Elsevier, Google Académico, Sciencedirect y Web of Science en conjunto con tesauros, filtros, palabras clave y lenguaje booleano. De esta manera fue posible obtener un total de 12 artículos de los cuales se extrajeron las metodologías, instrumentos y resultados relevantes, permitiendo concluir la preocupación por la presencia de cadmio y plomo en las plantaciones de cacao, el establecimiento de límites en el territorio colombiano y la necesidad de aumentos en la inversión en investigación y monitoreo para reducir la contaminación por estos metales en el cacao.

Palabras claves: theobroma cacao, metales pesados, contaminación, América latina, límites permisibles.

Analysis of cadmium and lead mobility in soils, leaves, fruits and leachates in cocoa plantations

Abstract

Currently, cocoa from sectors such as Latin America and the Caribbean are among the most exported in the world. In normal amounts, the presence of metals is common in the vegetable soil, in the case of cadmium and lead, they are mobile elements that are found in the soil and are transported from the roots of the plants to the stems, leaves and the fruits. However, in high amounts, contamination for the soil and the human population can be extremely harmful. For this reason, the present study aims to analyze the mobility of cadmium and lead in soils, leaves, fruits, and leachates in cocoa plantations in Latin America between 2018-2023. This was done by identifying, characterizing, and retrieving information in databases such as Scopus, SpringerLink,

¹ Artículo presentado como opción de grado para optar al título de Químico Ambiental.

² Estudiante pregrado, Universidad Santo Tomas, Bucaramanga, gustavo.calderon@coaspharma.co.

³ Químico, magister, Universidad Industrial de Santander, Investigador del grupo de investigaciones ambientales para el desarrollo sostenible en las líneas de investigación de química computacional y tecnologías limpias, Universidad Santo Tomas.

Elsevier, Google Scholar, Science direct, and Web of Science in conjunction with thesauri, filters, keywords, and Boolean language. In this way it was possible to obtain a total of 12 articles from which the methodologies, instruments and relevant results were extracted, allowing to conclude the concern for the presence of cadmium and lead in cocoa plantations, the establishment of limits in the Colombian territory and the need for increased investment in research and monitoring to reduce contamination by these metals in cocoa.

Keywords: theobroma cacao, heavy metals, contamination, Latin America, permissible limits.

Introducción

El suelo es la principal despensa de alimentos, en donde es posible encontrar nutrientes, minerales y otros elementos químicos como el cadmio (Cd) y el plomo (Pb) (Bravo et ál., 2021). Sin embargo, es necesario destacar que estos se encuentran de manera natural en la corteza terrestre, pero al encontrarse en forma mineral pueden ser fácilmente absorbidos por las plantas y de esta manera transferirse al ser humano (Huamani et ál., 2012).

Históricamente los cultivos de cacao se han desarrollado en países como, África occidental, que reporta una producción mundial del 68%, sudeste de Asia y América central y del sur, con producciones del 17 y 15% respectivamente. (Beg et ál., 2017)

A nivel mundial existe la preocupación sobre la presencia en los tejidos del cacao, de metales pesados, entre ellos (y con mayor interés) el cadmio y el plomo; ya que, la exposición prolongada a estos elementos tóxicos puede provocar efectos adversos en la salud. La Agencia Internacional de la Organización mundial de la salud clasifica al cadmio como un cancerígeno humano. (International Agency for Research on Cancer, 2021). Es por ello, que la Comisión Reguladora de la Unión Europea en abril del año 2023, reglamentó los límites máximos de contaminantes en alimentos. En el caso del cadmio el contenido máximo es de 0,80mg/Kg en chocolate con un contenido de materia seca total de cacao $\geq 50\%$, y de 0,1mg/Kg para plomo. (European Union Commission Recommendation, 2023). Estos límites han generado preocupación en algunos países productores de cacao en América latina; puesto que, estudios a los cultivos han demostrado que el grano producido localmente puede presentar una contaminación elevada con metales pesados y; por ende, la exportación a países de la Unión Europea se reduciría. (Meter et ál., 2019).

En América latina y el Caribe, las mayores áreas destinadas a la producción agrícola han tenido un continuo aumento debido a que tienen las reservas de tierra más cultivables del mundo (PNUMA, 2003). Este proceso genera un desbordado crecimiento demográfico, lo que, a su vez, equivale a un consumo de alimentos mayor, y, por tanto, a una intensificación de la agricultura de la mano del uso de los recursos naturales en general. Así, esta es una de las principales causas de la degradación de los suelos por la contaminación de áreas destinadas para la producción agrícola debido al elevado uso de productos agroquímicos que causan pérdida de los nutrientes del suelo, pérdida de la capa vegetal, entre otros (Bautista, 1999).

En la actualidad el cacao de sectores como América Latina y el Caribe son de los más exportados en el mundo (Araque et ál., 2020). El cacao es un elemento fundamental para la

Generalidades

En el caso particular del municipio de San Vicente de Chucurí, uno de los productores más importantes de cacao de Santander, en un estudio realizado en el año 2010, se encontraron en los suelos donde se cultiva el cacao concentraciones de cadmio de 0,53 y 4,15 mg/Kg, y en los granos concentraciones entre 4 y 6 mg/Kg, lo cual ha representado un peligro potencial para los consumidores (Martínez y Palacio, 2010).

toneladas

- ≤ 209.91
- ≤ 1070.36
- ≤ 13057.91
- ≤ 138211.18
- > 138211.18

Adaptado (Sánchez et ál., 2019).

En cantidades normales, la presencia de metales es común en el suelo vegetal; en el caso del cadmio y el plomo, son elementos móviles que se encuentran en el suelo y son transportados desde las raíces de las plantas a los tallos, las hojas y los frutos (Peláez, et ál., 2016). Al mismo tiempo, si se realiza el uso de fertilizantes de fosfato, se obtiene una mayor concentración de Cd, debido a que estos fertilizantes se producen de rocas de fosfato que contienen concentraciones que oscilan entre 1 a 150 mg/kg de cadmio (Merchán, 2022).

En el caso del cacao, los frutos y sus semillas contienen menos cadmio que las hojas debido a que la planta absorbe y moviliza altas concentraciones disponibles principalmente del suelo a la raíz, el tallo y las hojas. (Jiménez, 2015).

Sin embargo, un estudio realizado por la Unión Europea (UE), demostró altos niveles de cadmio y plomo en productos provenientes del cacao, debido a la predisposición de este a la absorción de metales pesados (Morales et ál., 2021).

Esta es una problemática de gran consideración puesto que estos metales pueden ser absorbidos por las semillas, las plantas y sus frutos y; por lo tanto, ser transferidos hacia el ser humano, generando riesgos considerables en la salud humana. Es importante resaltar que los valores de metales pesados contenidos pueden variar dependiendo de los componentes presentes en el suelo y las diferentes características ambientales (Prieto, 2009). Por esta razón, es esencial realizar estudios y análisis para identificar la presencia de estos metales pesados en los cultivos de cacao y establecer medidas para minimizar su presencia en el producto final.

Ahora bien, la transferencia de estos elementos al ser humano por medio de la alimentación ha creado alertas sobre el riesgo considerable que existe para la salud humana (Baptista et ál., 2022). Una reciente investigación realizada por La Unión de Consumidores de Estados Unidos ha publicado en su revista Consumer Reports que macroempresas de chocolates como Lindt Excellence, Scharffen Berger, Lili's, Hershey's entre otras, reportaron presencia de cadmio y plomo en cantidades considerables en los productos finales, generando alertas a nivel mundial, puesto que la exposición continua de estos metales puede ocasionar hasta la muerte (Loria, 2023). Sin embargo, para entender inicialmente el origen y la presencia de estos metales en el cacao, es necesario comprender el ciclo de vida de dicho producto:

Fase de vivero: esta fase hace referencia al establecimiento inicial y a las posibles adaptaciones de la zona de trabajo para que la plantación se realice de manera correcta. Habitualmente, estas zonas para siembra se ubican en zonas despejadas dentro de zonas arboladas y se emplean por periodos de tiempo cortos e intermitentes para lograr coincidir con la temporada lluviosa del año (Quiroz y Mestanza, 2012). Esta etapa es considerada una de las más importantes, puesto que es indispensable la germinación de las semillas, por lo que el control y cuidado de cada una de estas debe ser exhaustivo, en especial teniendo en cuenta el control de plagas y enfermedades (Véliz, 2017). Dado el tamaño del producto y el control constante de cada una de las etapas, esta fase de vivero no es considerada como una fase de riesgo para la transferencia de metales pesados como el cadmio y el plomo (Agudelo et ál., 2021).

Fase de selección de terreno: según (Somarriba et ál., 2011) esta es una etapa fundamental en la obtención de cacao debido a la posible presencia de metales en el suelo, haciendo necesaria la visualización constante del terreno para evitar fallencias en el producto. Asimismo, eventos relacionados a fallas geológicas, movimientos de la tierra, el clima, entre otros, también son

responsables de la presencia de estos elementos en los cultivos (FAO, 2014). Cada una de las capas del terreno en donde se realiza la siembra tiene una función en específico favoreciendo a la calidad del producto. Por ejemplo, al hablar de la capa superficial o capa cultivable, es posible encontrar todos los nutrientes necesarios para el desarrollo de la planta y debajo de ella, en el subsuelo, se encuentran todos aquellos metales pesados como el plomo y el cadmio (Bravo et ál., 2021).

Fase de crecimiento y producción: en esta fase se habla en mayor medida de la adaptabilidad de la planta de cacao; puesto que, las deficiencias y toxicidades de los micronutrientes afectan negativamente la salud de las plantas y los animales y, además, causan reducciones en la tasa de crecimiento y rendimiento de la planta. Entre los síntomas evidentes son estrés fisiológico y, en casos extremos, la muerte de la planta. En muchas partes del mundo, los efectos adversos de las deficiencias de metales pesados esenciales (lroides) son económicamente más importantes que las toxicidades derivadas de la contaminación del suelo (Pérez, 2014).

Considerando las tres fases enunciadas anteriormente, se hace indispensable tener en cuenta el comportamiento del cadmio en los suelos; ya que, el cadmio puede llegar a cada una de estas fases por las características físicas y/o químicas de los mismos. Según estudios, las concentraciones de cadmio se encuentran en la capa superficial del suelo (0-20 cm) y en suelos con alto porcentaje de materia orgánica existe mayor fijación de Cadmio. Adicionalmente, el pH de los suelos es un factor que afecta la biodisponibilidad del cadmio, las concentraciones de cadmio en suelos muy meteorizados y volcánicos son medianamente bajas (0,15 – 0,23 mg/Kg), mientras que en suelos aluviales las concentraciones son más altas (0,41 – 0,61 mg/Kg) (Velásquez et ál., 2022).

Por otra parte, algunos eventos geológicos pueden incrementar las concentraciones de los metales pesados, y existen modificaciones antropogénicas que pueden aumentar los niveles de cadmio y plomo en las plantas, siendo el más conocido: el uso de pesticidas y agroquímicos en las plantaciones. Según (Silva, 2019), los herbicidas, pesticidas y fungicidas están cargados de metales pesados que ayudan a la eliminación de plagas. No obstante, también contienen fragmentos perjudiciales para la composición del suelo, generando no solo problemáticas ambientales significativas, sino que también aceleran los procesos de transmisión al ser humano, expresándose en altos niveles de toxicidad y haciéndose visible en el suelo en los sumideros químicos.

Por esta razón se han propuesto con el paso de los años metodologías de mitigación de movilización de metales pesados en las plantaciones de cacao, en donde sobresalen elementos educativos interactivos que abordan y explican paso a paso los diseños metodológicos enfocados a los análisis de suelos, granos, hojarasca, elementos compostables y fertilizantes (León et ál., 2008).

Sin embargo, los procesos de solución existentes representan grandes inversiones económicas para los pequeños y medianos cacaoteros, que, percibiendo la necesidad de estas grandes inversiones y la poca retribución optarán por el no acatamiento de estas sugerencias, lo cual acarreará la continuidad de procesos productivos contaminantes para los humanos y posterior la señalización de su producto en las grandes industrias y por tanto inviabilidad económica en el mediano y largo plazo (Peraza, 2022). Por eso, se realiza la formulación de la siguiente pregunta problema: ¿Cuáles podrían ser las estrategias que aseguren el cumplimiento de las regulaciones de exportación de cacao en lo referente a las concentraciones de cadmio y plomo en fruto,

considerando además el cuidado del suelo, raíz, hoja y lixiviados de cacao para garantizar atributos óptimos que validen la calidad propia del cacao?

Por lo que, el objetivo general del presente es analizar la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao en América Latina entre el 2018-2023, para lo cual se plantean objetivos específicos como identificar los estudios relacionados con la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao en América Latina entre el 2018-2023, caracterizar las diferentes metodologías utilizadas en la programación de mantenimientos y control de movilizados de cadmio y plomo en estas zonas, y discutir los resultados sobre las metodologías para la medición y control del cadmio y plomo en los cultivos de cacao en América Latina, especialmente en Colombia. Asimismo, se busca analizar la influencia que tienen los metales pesados (loides) como el cadmio y el plomo en las plantaciones de cacao y toda la cadena productiva; puesto que, a pesar de que estos metales son esenciales en pequeñas cantidades para el crecimiento de las plantas y animales, cantidades elevadas de los mismos puede provocar enfermedades y riesgos irreversibles (Alloway, 2013). No obstante, dada la fuerte correlación existente entre el contenido de metales pesados en el suelo y la concentración en los vegetales, hay un progresivo riesgo asociado por el consumo de vegetales y la biodisponibilidad de los metales pesados, al ser estos cultivados en áreas contaminadas.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, y teniendo en cuenta que la agricultura en el presente siglo debe responder por la sostenibilidad de la cadena alimentaria y garantizar que las tecnologías de producción no degraden el ambiente y cumplan con los requerimientos ambientales (Dach y Starman, 2005), esta investigación busca analizar la movilidad de cadmio y plomo disponible en un suelo y sus consecuencias en las plantaciones de cacao, contribuyendo en la apertura de una amalgama de investigaciones que permitan disminuir la brecha de desconocimiento sobre la relación entre las variables ambientales, la presencia y distribución de metales pesados, para que posteriormente, sea posible establecer estrategias de control y remediación que permitan disminuir la concentración de estos y mitigar los posibles problemas de salud pública, ambientales y económicos (Reyes et ál., 2016).

Adicionalmente, los resultados de la presente investigación pueden impulsar a la toma de acciones referentes a la salud pública, la protección medio ambiental, los impactos económicos y el cumplimiento de las normativas referentes a las partes por millón (ppm) permisibles para cada tipo de metal pesado, apoyando las regulaciones y permitiendo mantener la calidad del producto final.

La realización de un proyecto de análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao es una medida importante y necesaria para identificar la presencia de estos metales pesados en el cultivo de cacao y establecer medidas preventivas para minimizar su impacto en la salud humana y el medio ambiente. En especial teniendo en cuenta que la realización de un proyecto de análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao puede ayudar a identificar las fuentes de contaminación y establecer medidas preventivas para minimizar su presencia en el cultivo de cacao. Esto puede incluir la implementación de prácticas agrícolas más sostenibles y la selección de variedades de cacao que sean menos propensas a la acumulación de metales pesados (Figueredo y Pinto, 2016).

Todo esto se resalta teniendo en cuenta que según Núñez (2022) entre los procesos de mitigación, disminución de contaminación de metales pesados en plantaciones cacaoteras esta la fitorremediación con factores de bioconcentración (FBC) y factor de translocación (FT). En el departamento de Santander, ha surgido la especie vegetal *Talaromyces santanderensis*, la cual ha demostrado obtener propiedades efectivas en la retención de Pb y Cd. Sin embargo, existen otras metodologías que se resaltan, están sistema agroforestal donde se integran, generando una disminución significativa de la contaminación en el proceso de producción con fertilizantes orgánicos específicos, aguas de riego tratadas, el uso de enmiendas correctivas de pH en dosis relevantes, fuentes de silicio, entre otros y como estrategias de suma importancia (Quiceno, 2022).

Además, la realización de este tipo de proyecto puede ser importante para cumplir con los estándares internacionales de calidad y seguridad alimentaria para el cacao, que exigen límites estrictos para la presencia de metales pesados en los productos alimenticios. En resumen, la realización de un proyecto de esta índole es esencial para proteger la salud humana y el medio ambiente, cumplir con los estándares internacionales de calidad y seguridad alimentaria y garantizar la sostenibilidad del cultivo de cacao a largo plazo.

Metodología

El diseño del estudio está basado en una revisión documental es una herramienta enfocada en la construcción del conocimiento por medio de procesos investigativos por medio del enriquecimiento de información (Gómez et ál., 2017). Adicionalmente, por medio de sondeos pretende registrar elementos relevantes que permiten el reconocimiento y la discusión de los hallazgos relacionados al objeto de estudio e investigaciones similares, facilitando las interrelaciones y la definición de conceptos de común uso (Valencia, 2020). Así mismo, el presente estudio se enmarca en una investigación de tipo descriptiva, donde se enfocan en las características o distribución de los fenómenos a estudiar (Veiga, 2008). Adicionalmente, se caracteriza por ser puntual con la información recopilada por medio de registros, análisis e interpretaciones, incluyendo propiedades, procesos y todo fenómeno que pueda ser sometido al análisis, lo que quiere decir que solo busca recolectar y medir información de los diferentes conceptos de estudios de índole dependiente o independiente, facilitando el entendimiento de la información (Guevara et ál., 2020).

Además, la investigación se realiza bajo el enfoque cualitativo dado que permite la obtención de información por medio de la utilización de objetivos o preguntas, haciendo énfasis en todos aquellos generales, dinámicos e individuales relacionados con el tema central de estudio (Vivar et ál., 2013). En suma, el estudio se ajusta a la interpretación de los datos por medio de la recolección no numérica de los mismos descubriendo y afinando así las preguntas del estudio (Baptista et ál., 2010), permitiendo abordar la problemática seleccionada sobre el análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao.

Las técnicas de recolección de datos son aquellas que permiten la obtención de datos para la realización del estudio (Arias, 2012). Al referirse a instrumento se puede decir que son el medio que componen el camino a través del que se hace posible implementar la ficha bibliográfica como técnica para recolectar la información dicho esto el instrumento llevado a cabo en este estudio fue una matriz documental donde se caracterizaron cada una de las investigaciones que podrán

apreciarse en la tabla 1 denominada caracterización de los estudios y la tabla 2 nombrada caracterización de la investigación.

Para el análisis de esta investigación, la revisión bibliográfica se realizó con ayuda de las bases de datos con convenio disponibles de la Universidad Santo Tomás, destacando fuentes de referencia confiables como Scopus, SpringerLink, Elsevier, Google Académico, Sciencedirect y Web of Science. Con el fin de reducir el número de resultados obtenidos en cada una de las plataformas informativas se emplearon palabras clave como “cadmium”, “lead”, “teobroma cacao” y “cocoa”, tesauros de fuentes como MeSH o DeCs, Emtree, lenguaje booleano y comillas y asteriscos. Posterior a esto, se realizaron filtros para obtener aquellos que contuvieran información referente al lapso de 2018 a 2023, que fueran preferiblemente publicados en revistas indexadas y que el idioma fuese inglés o español. Dichos criterios favorecieron la exploración de fuentes con relevancia informativa que permitieran el sustento investigativo (Figura 2).

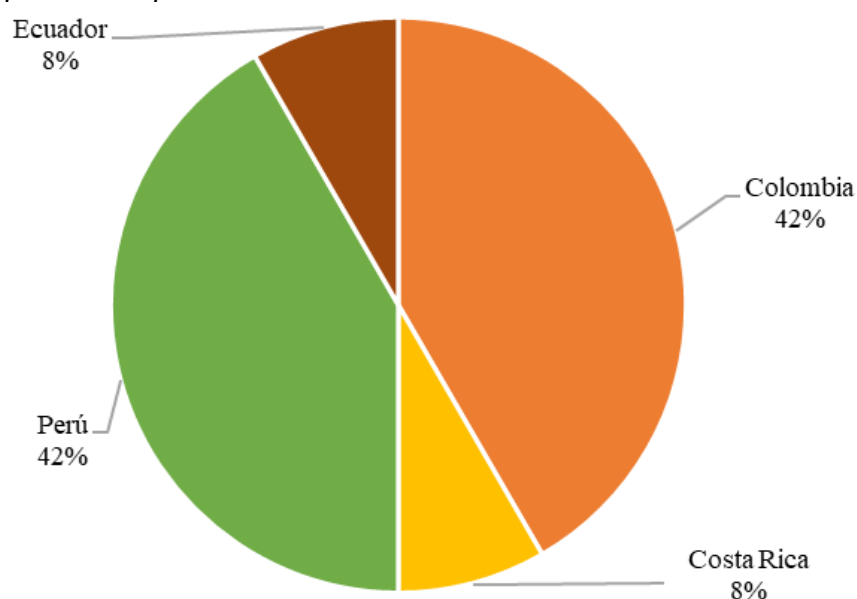
La recolección de datos e información fue plasmada de manera específica en las tablas de caracterización de los estudios como instrumento, para luego proceder al análisis y la definición de resultados. Estas tablas permiten obtener en primera instancia la información general de la fuente obtenida, haciendo posible la creación de una matriz con los datos de publicación, ciudad, título, autores y tipo de documento. Por otra parte, la segunda tabla permite profundizar en la investigación. Destacando los objetivos principales, los instrumentos de recolección, el tipo y enfoque del estudio y los resultados más destacados.

Figura 2. Metodología e instrumentos y técnicas de recolección

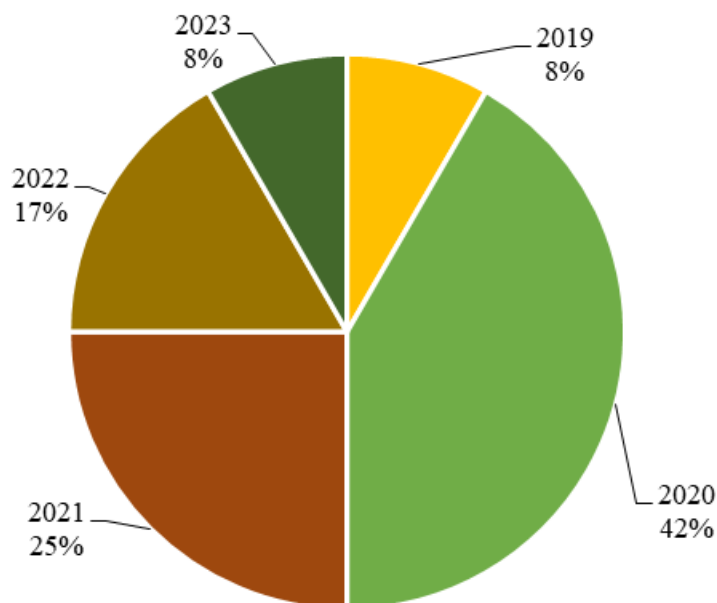


En este orden de ideas, es importante antes de entrar al análisis de la información entender que, al hablar de los lugares de investigación en torno a América Latina, siendo esta la macrozona de estudio es posible visualizar una concentración marcada de investigaciones en Colombia y Perú, alcanzando cada una cerca del 50% de los estudios recuperados, encontrando a su vez una minoría en países como Ecuador y Costa Rica. Esto puede deberse a que Colombia y Perú se encuentran catalogados dentro de los principales productores y exportadores de cacao a nivel mundial, presentando a su vez, afectaciones por la contaminación de metales pesados en suelos y agua como consecuencia de las actividades mineras u otras actividades antrópicas, lo que ha desencadenado un interés mayor en estudiar la presencia del Cd y el Pb en los cultivos y plantaciones de cacao y la creación de regulaciones más estrictas a nivel legal en cuanto a calidad y seguridad alimentaria (Florida, 2021).

Figura 3. *Clasificación de países de estudio en América Latina*

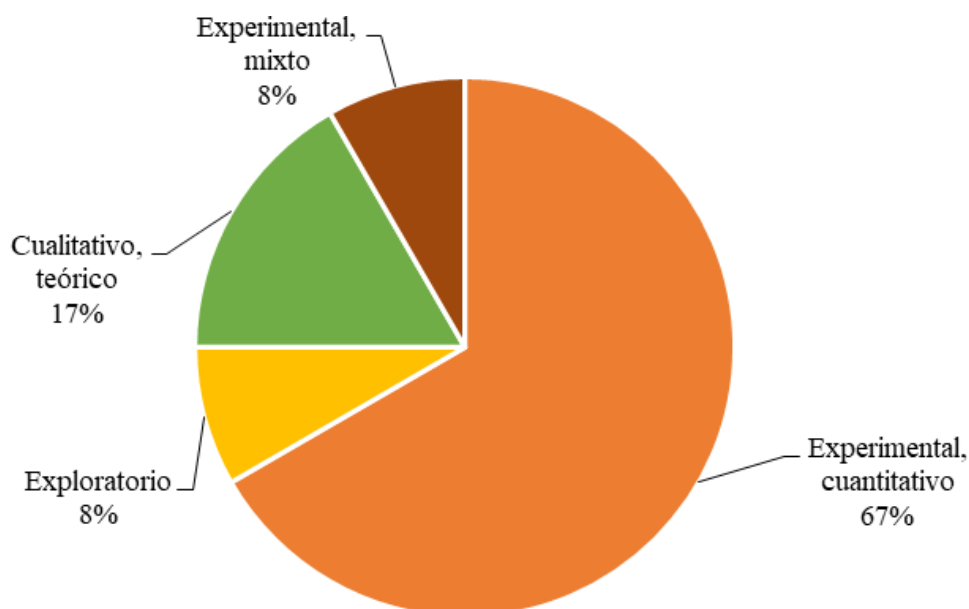


En suma, luego de la aplicación de filtros para la obtención de los artículos en los años requeridos, fue posible visualizar que la mayoría de los estudios pertenecen al año 2020, lo cual puede deberse a los proyectos referentes a la seguridad alimentaria, la implementación de normativas más estrictas o la visualización del impacto ambiental y poblacional generado por la contaminación de metales. Adicionalmente, es posible visualizar como a pesar de que los años siguientes no presentan la misma cantidad de estudios que en el año enunciado, los porcentajes son mayor a los presentados en el año 2019 (8%) o el 2018 (0%), destacando que además, fue recuperado un documento del año 2023, por lo que teniendo en cuenta que es este el año de realización del presente documento, se presentan panoramas alentadores con respecto a las investigaciones de la movilidad de estos metales en las plantaciones de cacao (Figura 5).

Figura 4. *Clasificación de años de publicación de los estudios seleccionados*

Además, se destaca que los 12 estudios fueron encontrados en diversas bases de datos y que además las metodologías relacionadas con enfoque y tipo de investigación presentaron variaciones importantes como es posible evidenciar en la figura 6, en donde más del 60% de los estudios fueron de tipo experimental-cuantitativo, por lo que fue necesario el establecimiento de relaciones de causa y efecto entre las variables por medio de la medición objetiva y cuantitativa de los resultados con el propósito de obtener conocimientos basados en la evidencia dada por la recolección de muestras y análisis (Sánchez, 2019). Además, este tipo de investigación permite la medición y registro de la variación de las variables dependientes e independientes, empleando a su vez técnicas estadísticas que facilitarán y sustentarán la información obtenida, determinando su significancia estadística (Cadena-Iñiguez et ál., 2017). Posteriormente, es posible visualizar que seguido a este enfoque y tipo experimental-cuantitativo, se encuentra el cualitativo-teórico, relacionado con la revisión y recopilación de información extraída gracias a fuentes de información.

Figura 5. Caracterización de las metodologías referentes al enfoque y tipo de investigación de los estudios



Resultados y discusión

Es importante tener en cuenta que con el propósito de ampliar la comprensión basada en el objeto de estudio, se realizaron matrices documentales donde fue posible evidenciar que los estudios se efectuaron en diferentes ubicaciones referentes a América Latina; información visible en la caracterización de estudios presente en la tabla 1, en donde se presenta el número de artículo, la fuente, los autores, nombre del artículo, ubicación del estudio, año de ubicación, tipo de documento y la referencia la cual empalma con la última sección del documento. Adicionalmente, se obtuvieron las diferentes metodologías en la caracterización de la investigación (tabla 2), en donde se presenta el objetivo de la investigación, el tipo de metodología empleada, los instrumentos o herramientas para la obtención de resultados, el límite de detección permisible para cadmio y plomo y los resultados, planteando las fortalezas y las limitaciones del estudio y la situación en general.

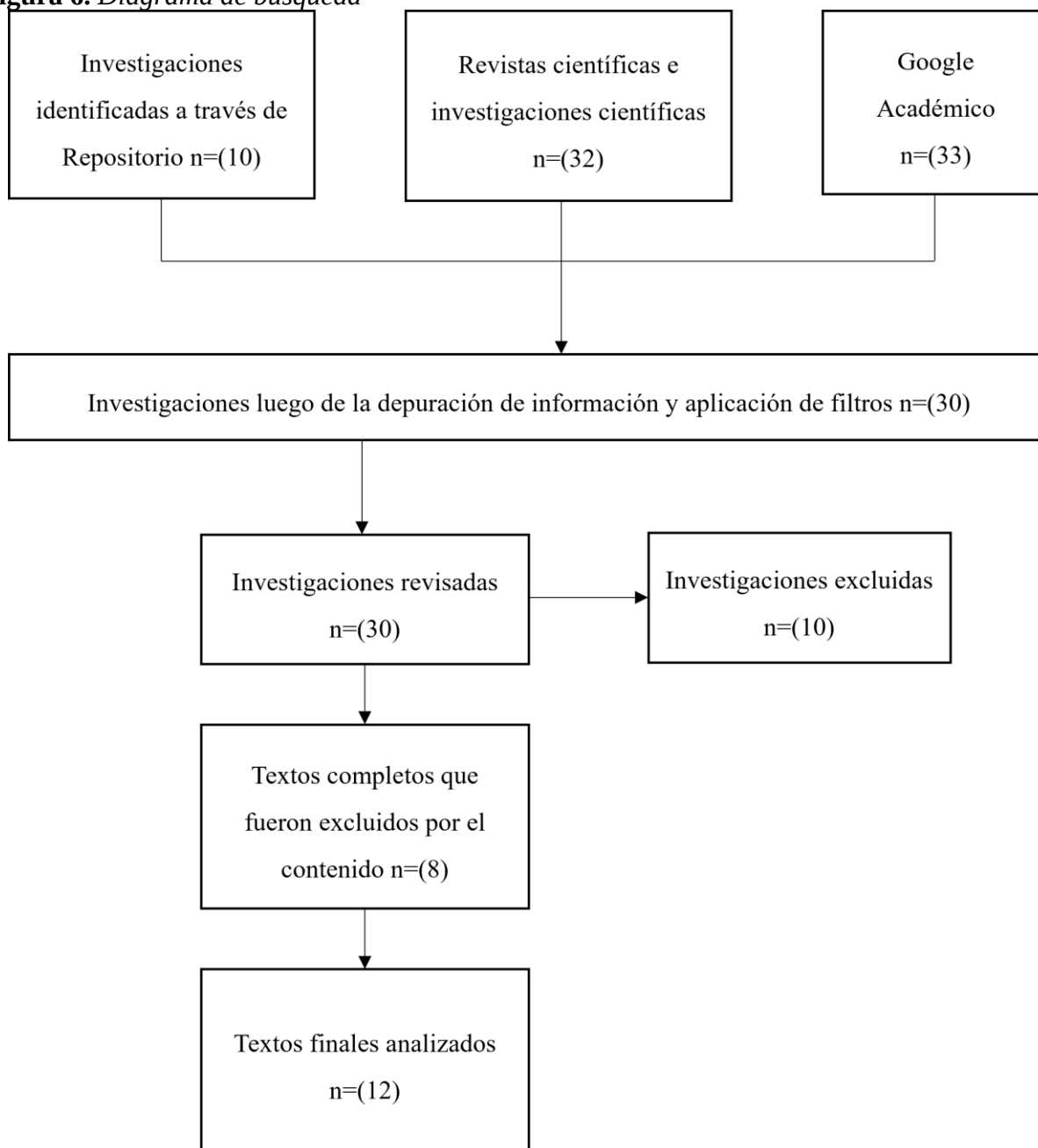
Totalidad de estudios

El uso de palabras clave, tesauros y lenguaje booleano dio como resultado 75 estudios relacionados que presentaban relación con los términos empleados. Sin embargo, en la revisión individual y la implementación de los otros filtros, fue posible depurar la base de datos obtenida, disminuyendo la cantidad de investigaciones a 12 documentos que desde el punto de vista del autor encajaban en el requerimiento de información para poder dar continuidad a la investigación (Figura 3).

Es posible visualizar como los procesos y filtros por los cuales pasaron las investigaciones permitieron obtener la información precisa para el seguimiento y desarrollo de la investigación relacionada al análisis de la movilidad de cadmio y plomo en suelos, hojas, frutos y lixiviados en plantaciones de cacao en América Latina entre el 2018-2023. No obstante, es necesario destacar

que muchos de los artículos descartados fueron empleados en el análisis para corroborar o desmentir la información obtenida, fortaleciendo de esta manera la información obtenida.

Figura 6. Diagrama de búsqueda



Análisis de los estudios recuperados

Luis Flores en su trabajo de investigación titulado “Determinación de los niveles de cadmio en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) ubicadas en la vereda La Esmeralda en el municipio de San Vicente de Chucuri, Santander” donde por medio de pruebas fisicoquímicas pudieron concluir que el suelo de la vereda La Esmeralda, cuenta con pH fuertemente ácido,

conductividad eléctrica baja, porcentaje de materia orgánica muy alta y concentraciones muy bajas de cadmio las cuales están por debajo de los límites máximos establecidos en la normatividad, dándole una categorización de un suelo óptimo para implementar cultivos de cacao tipo exportación. Estos suelos se caracterizaron por su textura arcillosa y franca y su principal aporte a nuestra línea de investigación es no utilización de fertilizantes como roca fosfórica en su proceso de preparación del suelo para evitar altos niveles de cadmio (Florez y Gomez, 2019).

En el año 2020, José Luis Torres, realizó un artículo científico en la revista Tecnología en Marcha, titulado “Determination of cadmium concentrations in cocoa plantations (*Theobroma cacao* L.) in Costa Rica” donde data las concentraciones determinadas de cadmio en el suelo, raíz, hoja y grano seco no fermentado de cacao en dos zonas productoras de Costa Rica. Se detectaron concentraciones de cadmio entre 0 y 8,70 mg/kg en el fruto de la planta; pero aun así se logró concluir que, de 40 muestras de suelos analizadas, solo 3 fueron positivas con cadmio las cuales fueron tomadas de la Región sur de Costa Rica, en las restantes no se detectó el elemento con un límite de detección de 1 mg/kg como lo dicta la normatividad. Otro aspecto analizado fue en el tejido foliar de la planta de cacao, donde se detectó una concentración entre 1,23 mg/kg y 11,10 mg/kg las cuales están muy por encima de 0,5 mg/kg siendo este el límite máximo permisible; se asumió su presencia a la utilización de insumos químicos durante el cultivo los cuales se utilizan en máximo de 2 veces al año. Las concentraciones de la raíz fueron similares a la zona foliar producto de la translocación del metal en la planta. Finalmente se afirmó que existe una alta probabilidad de que el cadmio encontrado en las raíces, hojas y fruto de cacao es proveniente del suelo y sus grandes concentraciones son producto de la propiedad de bioacumulación del metal en la planta (Torres y Furcal, 2020).

El cacao ha sido cultivado en América Latina durante miles de años por civilizaciones antiguas como los mayas y los aztecas. Estas culturas lo consideraban sagrado y lo utilizaban tanto como alimento como en rituales religiosos. La herencia cultural del cacao sigue siendo parte integral de la identidad de muchas comunidades de sur América. En la última década, la demanda del cacao ha crecido significativamente a nivel mundial, representando aproximadamente unos 70.000 km² de tierra cultivada para este producto, ubicándose con más del 30% en la zona centro y sur América, es decir hacia las zonas periféricas de la línea ecuatorial. Sonia Aguirre en compañía de Nelson Piraneque y José Vásquez escribieron un artículo científico titulado “Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: emphasis in cadmium” el cual fue publicado por la revista Ciencia y Tecnología en el año 2020, donde evaluaron las concentraciones de metales pesados como los son el cadmio, el níquel, el plomo y el cromo en dos regiones productoras de cacao al norte del país. Las partes de la planta que fueron analizadas son la hoja, el fruto, la cascara una concentración inferior a la establecida por la normatividad de la EPA, la cual fue entre 0,51 mg/kg y 0,66 mg/kg, pero aun así son cifras que se pueden catalogar como riesgosas para entidades como la Unión europea, haciendo que sea un impedimento para la exportación del producto hacia ese continente. En cuanto al suelo, se encontraron concentraciones mínimas de cadmio, sugiriendo que las concentraciones halladas en el tejido vegetal son de origen antropogénico (Aguirre y Vasquez, 2020).

La contaminación por cadmio amenaza de manera tangible a los productores de cacao, ya que esta planta presenta una capacidad elevada de bioacumulación de metales pesados, haciendo que sus concentraciones se realcen en los frutos que finalmente son los principalmente aprovechados en este cultivo. Es importante mencionar que el pH del suelo juega un papel

importante en este proceso de absorción, ya que a condiciones idóneas las raíces de la planta cumplen dicha función con mayor capacidad. En el año de 2020, Manuel Oliva junto con su equipo de investigación realizaron un estudio investigativo de la absorción del cadmio en los árboles nativos de cacao en tierras agrícolas de Bagua, Perú; donde se midieron concentraciones de cadmio encontrando rangos entre 1,02 mg/kg y 3,54 mg/kg en muestras de suelo tomadas a 29 fincas y 0,49 mg/kg y 2,53 mg/kg en el tejido vegetal de la planta; dando una alta variabilidad en los análisis de dichas muestras, sin embargo se pudo evidenciar que en las raíces de la planta de cacao, las concentraciones se quintuplicaban afectando la utilización del fruto para exportaciones por el no cumplimiento de la normatividad en cuanto al límite permisible (Epquin y Leiva, 2020).

Para el año 2018 existían aproximadamente 170.000 hectáreas sembradas con cultivo de cacao el cual posee una significativa importancia para Colombia, ya que no solo constituye una tradición arraigada en su historia agrícola, sino que también desempeña un papel crucial en la economía y el desarrollo rural del país. Colombia es reconocida por producir cacao fino de aroma, altamente valorado en el mercado mundial por sus sabores únicos y alta calidad, a pesar de no ser el mayor productor de dicho alimento, puesto que ocupa África. El sector cacaotero brinda oportunidades de empleo y mejora los ingresos de miles de familias, especialmente en regiones rurales, contribuyendo así a la reducción de la pobreza y la promoción de la sostenibilidad ambiental a través de prácticas de cultivo responsables. Adicionalmente, el cacao colombiano es un elemento de identidad cultural y turística, promoviendo el ecoturismo y la conservación de áreas biodiversas. En conjunto, el cultivo de cacao juega un papel integral en la diversificación económica, el bienestar social y la preservación del patrimonio natural de Colombia (Barona y Serrano, 2020).

La planta de cacao ejemplifica el proceso de translocación de los metales pesados desde el suelo hasta la población que lo consume, representando afectaciones y riesgos a la salud humana. Eduar Antonilez y su equipo de investigación realizaron un informe titulado “Estado Actual de la Cacaocultura: Una Revisión de sus Principales Limitantes” en el año 2020, donde expone las generalidades del cultivo, las plagas y enfermedades del cacao, y los problemas de contaminación que afronta con respecto a los metales pesados los cuales están ligados con padecimientos como problemas renales, afectaciones respiratorias, esqueléticos, de índole reproductivo y endocrinos (Barona y Serrano, 2020).

La presencia de cadmio en los cultivos de cacao plantea una seria problemática debido a sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. El cadmio es un metal pesado tóxico que puede acumularse en las plantas de cacao a través del suelo contaminado y prácticas agrícolas inadecuadas. Consumir productos de cacao con niveles elevados de cadmio puede resultar en problemas de salud, incluyendo daños al sistema renal, óseo y cardiovascular. Dado que el cacao es un ingrediente fundamental en la fabricación de chocolate y otros productos alimenticios, la presencia de cadmio plantea preocupaciones en términos de seguridad alimentaria y regulaciones internacionales. La gestión de esta problemática implica adoptar prácticas agrícolas más cuidadosas, mejorar la calidad del suelo y establecer límites de cadmio en los productos cacaoteros, garantizando así la protección tanto de los consumidores como del entorno agrícola. Jimmy Rosales, junto a Jorge Breña, analizaron los niveles de cadmio en los cultivos de cacao en el interior de Perú; realizaron estudios de espectrofotometría de absorción atómica para hallar dichos niveles de Cd en la planta y suelo. Concluyeron que el nivel promedio de las mediciones fue de 1,4 mg/kg y una correlación entre el valor del nivel y la edad del cultivo junto preparación previa del

suelo con fertilizantes o actividades antropogénicas. Lograron realizar un mapa geoquímico de Cd en suelos del corredor de Campo Verde-Honorio Tournavista en Perú, para posteriores planes de mitigación por parte de las autoridades ambientales y de agricultura (Rosales y Breña, 2020).

Un año después, Jimmy Rosales junto a su equipo de investigación, realizaron un artículo científico donde recopilaban información de las concentraciones de cadmio y plomo (metales pesados) presentes en el suelo usado para el cultivo de cacao en la zona de Satipo - Junín, Perú. Las muestras de suelo se recolectaron con una profundidad de 30 cm por debajo del nivel del suelo periférico, fueron secadas a una temperatura de 105°C durante 2 horas y posteriormente una prueba por absorción atómica. Luego de los resultados, lograron concluir que las concentraciones halladas fueron en promedio de 1,25 mg/kg por debajo de los estándares permisivos de la normatividad nacional, no obstante, no cumplían con la normatividad europea, negándose la posibilidad de exportar dicho producto al continente europeo (Rosales y Chavez, 2021).

Algunas concentraciones encontradas en la literatura, de Cd en el suelo de diferentes países latinoamericanos, las podemos visualizar en la siguiente tabla, la cual fue elaborada por la revista de la facultad nacional de agronomía de la universidad nacional de Colombia, dicha tabla ayudó a la creación de un mapeo de la distribución de suelo contaminante por Cd utilizado para cultivos de cacao con una caracterización de tres rangos: entre 0,0 mg/kg y 0,1 mg/kg, entre 0,1 mg/kg y 0,8 mg/kg y finalmente el intervalo crítico con valores superiores a 0,8 mg/kg (Rofner, 2021).

Figura 7. Concentraciones de cadmio en suelos de algunos países de Sur América.

References	Country	Samples	Cd Level ($\mu\text{g g}^{-1}$)
Araujo-Abad <i>et al.</i> (2020)	Ecuador	--	0.304
Argüello <i>et al.</i> (2019)	Ecuador	560	0.44
Barraza <i>et al.</i> (2019)	Ecuador	145	0.20
Barraza <i>et al.</i> (2017)	Ecuador	113	0.44
Chávez <i>et al.</i> (2015)	Ecuador	76	0.85
Mite <i>et al.</i> (2010)	Ecuador	568	0.49
Chambi (2010)	Bolivia	18	0.39
Gramlich <i>et al.</i> (2017)	Bolivia	--	0.20
Aguirre-Forero <i>et al.</i> (2021)	Colombia	--	0.02
Silva (2019)	Colombia	--	0.096
Charrupi and Martínez (2017)	Colombia	--	1.15
Marrugo-Negrete <i>et al.</i> (2017)	Colombia	--	0.04
Almeida (2016)	Brasil	50	0.705
*	Peru	160	0.33
Total Samples		1727	
Average			0.40

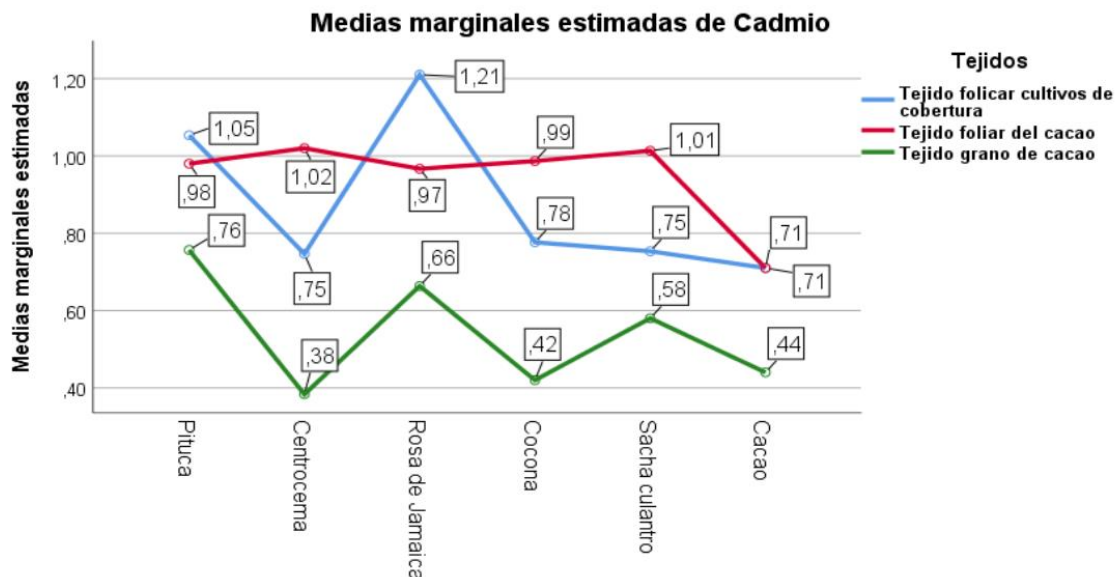
Adaptado (Rofner, 2021).

El incremento de la concentración de cadmio en el suelo representa una problemática ambiental y agrícola de gran envergadura. El cadmio es un metal pesado altamente tóxico que puede acumularse en los suelos debido a diversas fuentes, como la liberación de residuos industriales, la aplicación incontrolada de fertilizantes y pesticidas, así como las actividades mineras. Esta acumulación en el suelo se convierte en un riesgo significativo, ya que las plantas, incluyendo cultivos como el cacao, pueden absorber el cadmio del suelo y transferirlo a través de la cadena alimentaria, llegando finalmente a los consumidores humanos. Además de su impacto en la salud humana, la contaminación del suelo con cadmio puede afectar negativamente la calidad y productividad de los cultivos, reduciendo los rendimientos y perjudicando la seguridad alimentaria. La gestión de esta problemática requiere medidas rigurosas de control de la contaminación, el uso responsable de insumos agrícolas y la promoción de prácticas sostenibles que minimicen la acumulación de cadmio en el suelo, salvaguardando así la salud ambiental y agrícola a largo plazo.

Jemima Fonseca, desarrollo un trabajo de investigación de carácter experimental en el año 2021, titulado “METALES PESADOS (Cd++, Pb++) EN GRANOS DE CACAO (*Theobroma cacao*) Y LA FITOEXTRACCIÓN DE CULTIVOS EN CALLEJONES, VALLE DEL ALTO HUALLAGA - PERÚ”, donde demostró la capacidad de Fito extracción o fitorremediación de metales pesados como el cadmio y el plomo acumulados en suelos usados para el cultivo del *Theobroma cacao* (cacao). La práctica experimental se basó en la utilización de especies de ciclo corto como *Colocacia esculenta* (pituca); *Centrocoma macrocarpum* (leguminosa forrajera); *Hibiscus sabdariffa* (rosa de Jamaica); *Solanum topiro* (cocona) y *Eryngium foetidum* (sacha culantro), las cuales tiene gran capacidad de absorción de metales; este tipo de cultivo se realizó en modalidad de callejones donde se evidencio significativamente 3 de las 5 especies utilizadas con resultados ambientalmente positivos, las concentraciones promedio de Cd en el tejido foliar del cacao fue de 0,71 mg/kg en comparación de las 5 especies de fitoextracción que se usaron, cuyas concentraciones tuvieron rangos desde 0,98 a 1,02 mg/kg, viéndose un valor relativamente inferior; así mismo se realizó una prueba con tejido del grano o fruto teniendo como testigo la concentración de cd en el grano del cacao la cual fue de 0,44 mg/kg frente a rangos de 0,58 a 0,76 mg/kg (Fonseca, 2021).

Lo logro concluir que 3 especies se destacaron en sus propiedades de bioacumulación de metales pesados, ayudando a descontaminar el suelo de metales pesados, dichas especies son: *Eryngium foetidum*, sacha culantro; *Solanum topiro*, cocona; *Colocacia esculenta*, pituca. Esta práctica de biorremediación se puede utilizar para intercultivos y así aportar una disminución significativa de la concentración de cadmio en los granos de cacao (Fonseca, 2021).

Figura 8. Diagrama de líneas del tratamiento con fitoextractores según tejidos y contenido de cadmio



Adaptado (Fonseca, 2021).

La correlación entre la minería aurífera artesanal y las concentraciones de cadmio en los suelos de cultivos de cacao se debe a una serie de factores interrelacionados. La minería aurífera artesanal a menudo involucra el uso de mercurio en la extracción de oro, lo que puede resultar en la liberación de este metal pesado en el ambiente. El mercurio, al ser liberado, puede interaccionar con los suelos y convertirse en metilmercurio, una forma altamente tóxica y soluble que se bioacumula en los organismos vivos, incluyendo las plantas de cacao.

El cadmio, por otro lado, también es liberado en la minería de oro, ya que puede encontrarse como un contaminante en los yacimientos auríferos. Las prácticas de extracción, como el uso de químicos y la liberación de desechos, pueden llevar a la dispersión de cadmio en el suelo circundante. Esto se agrava cuando las actividades mineras no están reguladas ni gestionadas adecuadamente.

Como resultado, los suelos en áreas cercanas a la minería aurífera artesanal pueden acumular tanto cadmio como mercurio, y esta acumulación puede tener consecuencias directas en los cultivos de cacao que se cultivan en esas zonas. Las plantas de cacao tienen la capacidad de absorber estos metales pesados del suelo, lo que a su vez puede resultar en la contaminación de los granos de cacao y, en última instancia, en productos derivados como el chocolate. Además, la salud del suelo puede verse afectada negativamente, reduciendo la productividad y calidad de los cultivos. Carolina Ramos, en el año 2022 escribió un artículo científico titulado “Sostenibilidad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en el distrito minero de Ponce Enríquez: un enfoque de trazas de metales” donde realizó un análisis de laboratorio a muestras tanto de suelo, follaje vegetal y del grano del cacao para realizar cuantificación de concentraciones de cadmio por medio es espectroscopia de fluorescencia atómica de vapor frío. Así mismo se correlaciono las concentraciones halladas en la planta con respecto a las concentraciones en el suelo, FACTOR DE TRANSFERENCIA (TF) y así poder analizar la translocación del contaminante desde el suelo a la planta; y finalmente el índice de ingesta diaria crónica CDI para estimar el riesgo a la salud

humana. Concluyeron que las concentraciones de los granos de cacao eran superiores que, en la cascarilla, hojas y cascara la cual genera preocupación ya que el fruto es la parte mas usada de la plata para productos alimenticios como el chocolate. Finalmente, el promedio de la concentración de cadmio en el suelo y diferente parte de la planta no supero el 0,2 mg/kg manteniéndose dentro del límite contemplado en la normatividad de la FAO (Ramos y Diaz, 2022).

En cuanto al plomo, se observa una bioacumulación en el follaje vegetal, dando a indicio a una posible forma de biorremediación a la hora de poda y eliminación de las hojas de cacao para así evitar la transferencia de metales pesados nuevamente al suelo.

Es importante mencionar los cálculos de ingesta diaria crónica realizados por Carolina Ramos, ya que se puede evidenciar que el riesgo no es cancerígeno posterior al consumo de productos a base del cacao producido en el distrito minero de Ponce Enríquez. Dichos cálculos se realizaron tomando consideraciones de peso en adultos de 70kg/persona y en niños de 15kg/persona (Ramos y Diaz, 2022).

Figura 9. *Cocientes de peligrosidad e índice de peligrosidad total para metales pesados*

	Cd	Pb
$\bar{C}$ (µg/L)	1.31×10^{-5}	3.56×10^{-6}
IDU Adults	1.07×10^{-5}	2.91×10^{-6}
CDI Children	5.84×10^{-5}	1.58×10^{-5}
RfD (mg/(kg-day))	5×10^{-4}	3.5×10^{-3}
HQ Adults	2.14×10^{-2}	8×10^{-4}
HQ kids	11.67×10^{-2}	4.5×10^{-3}

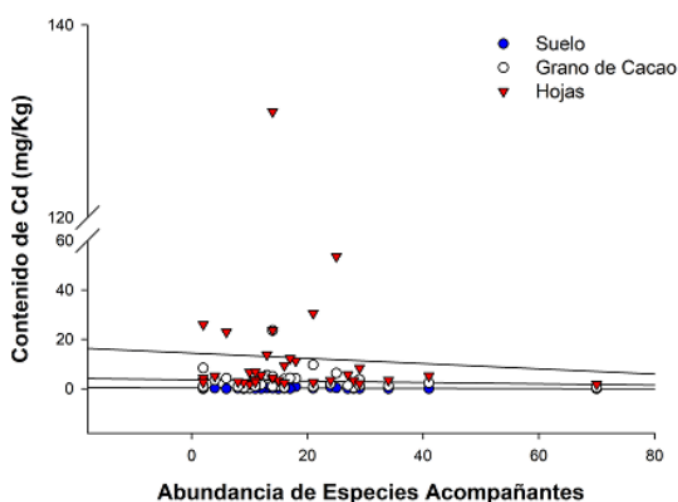
Adaptado (Ramos y Diaz, 2022).

Finalmente, Carolina Ramos enuncia la importancia de realizar controles de monitoreo constantes a los cultivos de cacao y estudiar más a fondo las alternativas de biorremediación para que las concentraciones de metales pesados como el Cadmio y el Plomo se mantengan dentro de los niveles permitidos, y las actividades antropogénicas como la minería no influyan en su crecimiento como planta.

El cultivo de cacao ha surgido como una estrategia de sustitución de cultivos ilícitos, como la coca, en Colombia debido a varias razones. El cacao es un cultivo que se adapta a diversas condiciones climáticas y suelos, lo que lo convierte en una opción viable para diferentes regiones del país. Además, el cacao es un producto demandado en mercados internacionales, lo que brinda oportunidades comerciales y económicas a los agricultores. A través de programas de apoyo, capacitación y financiamiento, se busca fomentar la adopción del cultivo de cacao, generando empleo y mejorando la calidad de vida de las comunidades rurales. Este enfoque no solo contribuye a reducir la producción de drogas ilícitas, sino que también promueve la conservación ambiental y el desarrollo sostenible en las áreas afectadas por el conflicto y el narcotráfico. Sin embargo, el éxito de esta estrategia depende de la colaboración entre el gobierno, organizaciones

internacionales y las comunidades locales para garantizar una transición efectiva y sostenible hacia la producción de cacao. En el año 2022, Kevin Merchán, realizó un trabajo de investigación titulado “Variación En El Contenido De Cadmio En Cultivos De Cacao (*Theobroma Cacao*) En Pauna Y Coper (Boyacá – Colombia). Análisis Desde La Diversidad De Las Comunidades Vegetales” donde analizo las concentraciones de cadmio el suelo, follaje vegetal y grano de cacao de 36 fincas cacaoteras de los municipios de Pauna y Coper en Boyacá. Las conclusiones que se observaron fue las concentraciones de Cd en el suelo era muy inferiores a las encontradas en el follaje vegetal y en los granos, esto es debido a la propiedad de bioacumulación de metales pesados de la planta y el uso de fertilizantes químicos fosfatados para su cuidado; así mismo concluyeron que la diversidad vegetal que acompaña a los cultivos de cacao (objeto de estudio) no aportaron un valor significativo de reducción en cuanto a la presencia del metal en el fruto del cacao.

Figura 10. Distribución de la abundancia de especies de árboles acompañantes al cultivo de cacao en relación a la concentración de Cd en el cultivo



Adaptado (Merchán, 2022).

Es bueno mencionar la utilización de otras especies como cultivos intermedios dentro de los surcos de la plantación de cacao como estrategia de mitigación ambiental en cuanto reducir los niveles de cadmio en el suelo. En Brasil se ha usado *Camaldulensis* y *Brachiaria decumbens*, arrojando resultados positivos en cuanto a la disminución de las concentraciones de metales pesados en los granos de cacao (Merchán, 2022).

La presencia de cadmio (Cd) en suelos de cultivo de cacao en Santander, Colombia, puede derivar tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Desde una perspectiva natural, la geología de la región puede influir en los niveles de cadmio en el suelo, ya que ciertos tipos de rocas y minerales pueden contener concentraciones variables de este metal pesado. Los procesos geológicos como la erosión y la lixiviación pueden liberar gradualmente cadmio en el suelo, lo que contribuye a su presencia en las zonas de cultivo de cacao. Además, las condiciones climáticas y la composición del suelo también juegan un papel en la movilidad y disponibilidad del cadmio en el entorno agrícola.

Por otro lado, las fuentes antropogénicas de cadmio en suelos de cultivo de cacao en Santander son igualmente significativas. Actividades humanas como la aplicación excesiva de fertilizantes fosfatados y el uso de agroquímicos que contienen cadmio pueden aportar a la acumulación de este metal en el suelo. La historia de la minería y la industria en la región también puede contribuir a la liberación de cadmio en el entorno, ya sea a través de la contaminación de aguas subterráneas o la deposición atmosférica. La combinación de fuentes naturales y actividades humanas puede llevar a niveles elevados de cadmio en suelos de cultivo de cacao en Santander, lo que plantea preocupaciones sobre la seguridad alimentaria y la salud pública (Joya, Huguet, y Pearse, 2023).

Valentina Joya, junto su equipo de investigación, publicaron un artículo científico titulado “Natural and Anthropogenic Sources of Cadmium in Cacao Crop Soils of Santander, Colombia” donde analizan las fuentes mas representativas que aporta a concentraciones altas de cadmio en los suelos de Santander, siendo que su valor promedio es de 1,90 mg/kg y 4,30 mg/kg en fruto, posicionándose como la segunda mas alta del país, sobrepasando con excesos el límite permisible de 0,60 mg/kg en suelos y concentración máxima de 1,3 mg/kg para granos de cacao para las exportaciones del mismo a la Unión Europea. La recolección de muestras fueron en total de 23 suelos, 12 rocas madre y 2 fertilizantes en tres fincas diferentes del departamento santandereano, y luego de un análisis de suelo y petrográfico concluyeron que todas las muestras de suelo presentan concentraciones por encima del nivel máximo dado por normatividad internacional y la presencia del Cd se da en fracciones residuales y oxidables, coligadas con la meteorización del lecho rocoso y otros procesos de pedogénesis; La roca madre en la zona de investigación muestra concentraciones inusualmente altas de Cd con valores de hasta 3 veces lo encontrado en literatura previamente para la zona del centro del país y finalmente el uso de fertilizantes dio una correlación positiva con el contenido del Cd en los suelos (Joya y Pearse, 2023).

Es importante mencionar la importancia de la implementación de políticas de mitigación, ya que puede incluir la regulación y monitoreo estricto de los niveles de cadmio permitidos en los fertilizantes químicos utilizados en la agricultura, así como el fomento de prácticas agrícolas sostenibles que reduzcan la necesidad de fertilizantes de origen químico. Se debe incentivar alternativas como la utilización de fertilizantes orgánicos, el reciclaje de materiales orgánicos y la adopción de técnicas de manejo del suelo que minimicen la lixiviación y acumulación de cadmio. Estas políticas deben ser acompañadas de programas de educación y capacitación dirigidos a los agricultores, para que comprendan los riesgos asociados con el uso excesivo de fertilizantes químicos y estén informados sobre las mejores prácticas agrícolas para prevenir la contaminación por cadmio.

En última instancia, estas nuevas políticas pueden contribuir a proteger la calidad de los suelos de cultivo, preservar la salud de los consumidores y fortalecer la sostenibilidad de la industria del cacao en Colombia, al mismo tiempo que se minimizan los impactos negativos en el medio ambiente.

Análisis de las herramientas e instrumentos metodológicos de los estudios

Ahora bien, referente a los instrumentos y herramientas empleadas en las investigaciones para la medición y control del cadmio en los cultivos de cacao y para la programación de mantenimientos y control de movilizadores de cadmio y plomo, es necesario tener en cuenta que

todos los estudios de tipo experimental-cuantitativo siguieron la misma ruta metodológica, pero con diferentes herramientas. Esta fue organizada de la siguiente manera: muestreo de suelos y plantas, análisis químico y físico, establecimiento de límites máximos, implementación de buenas prácticas agrícolas y la estrategia de capacitación de productores, permitiendo así el monitoreo, medición y control de los metales en la plantación.

Como lo evidencia la tabla 2, la recolección de muestras y plantas es una de las metodologías más empleadas para el control de la presencia de cadmio y plomo en las plantaciones de cacao, por medio de la toma de muestras para medir los niveles de los metales pesados. Sin embargo, en conjunto con esta toma de datos, se tienen en cuenta factores como el terreno, las condiciones climáticas de la zona de estudio y la selección de los puntos de muestreo por medio de la definición del área. Aquí, además, es posible visualizar que el procesamiento de las muestras de plantas se realiza por medio de la eliminación de residuos de suelo y polvo para el posterior secado y molienda que permitirá proceder a los análisis químicos (Oliva et ál., 2020).

Referente a los análisis químicos y físicos, la mayoría de los estudios incluyen análisis de pH, conductividad, textura y materia orgánica, los cuales se realizan posterior a la preparación de las muestras. En primera instancia, al hablar del pH, es posible observar que es necesario hacer la medición del factor puesto que las directrices indican que el pH puede verse modificado en relación con la acidez o alcalinidad de los suelos y la contaminación de estos por los diferentes metales, lo cual puede afectar la movilidad, como en el caso del cadmio, en donde no solo la movilidad, sino también la disponibilidad se encuentra controlada por este parámetro en correlaciones positivas; a diferencia del plomo, en donde a pesar de que también se presentan correlaciones, están son de tipo negativo (Arévalo et ál., 2016).

Con respecto a la conductividad, dicho factor permite la clasificación de los suelos como salinos o no salinos, lo cual se relaciona de manera directa con el pH. Normalmente, al hablar de suelos no salinos, se hace referencia a un acompañamiento de pH ácido, situación que se suele presentar en zonas de altas precipitaciones en donde las bases del suelo se lavan por medio de acciones de escorrentía (Flórez y Gómez, 2019). La conductividad eléctrica ayuda a determinar de manera simultánea la calidad y fertilidad del suelo, por lo que según las investigaciones visualizar valores de conductividad baja, con pH ácidos y concentraciones de Pb y Cd baja, afectando también el rendimiento del cultivo (Rosales et ál., 2021).

Al hablar de la materia orgánica y la textura, es posible visualizar que, en las evaluaciones de retención de cadmio, normalmente, se presenta una mayor retención en el suelo con un contenido mayor de materia orgánica y textura arenosa (Furcal-Beriguete y Torres-Morales, 2020); situación opuesta al hablar del plomo en donde se evidencia la presencia de arcillas, dificultando la retención en el suelo y disminuyendo el contenido de materia orgánica (Huamani et ál., 2012).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que los límites permisibles de cadmio y plomo varían dependiendo de la ubicación de la plantación y de la parte de la planta a la cual se haga referencia, puesto que los niveles elevados de transferencia de dichos metales del suelo a las raíces y de estas al resto de la planta pueden ser un motivo de preocupación principal, ocasionando la movilidad a los cotiledones, en especial teniendo en cuenta que en la mayoría de los estudios evaluados estas concentraciones excedían los límites máximos.

Es por esto que, es necesario destacar que, en los últimos años, a pesar de que se han presentado reducciones importantes con respecto a la presencia del cadmio por transferencia en la dieta, el uso de fertilizantes fosfatados, el uso de aguas de riego salinas, los contenidos elevados de arena, pH ácidos y deficiencias de zinc, no permiten la eliminación de los excesos del metal en las plantaciones, perpetuando la relación de la presencia del Cd con trastornos como el cáncer, enfermedades óseas o enfermedades degenerativas (Jiménez, 2015). Sin embargo, al hablar del plomo, el panorama no es más alentador puesto que el consumo en edades cortas puede provocar daños significativos e incrementar los riesgos de aparición de cáncer, el cual a su vez puede generar daños en el nacimiento o en procesos reproductivos (Ordoñez et ál., 2020).

Así mismo, otra de las herramientas empleadas en los análisis de movilidad de los metales enunciados es la digestión del cadmio y el plomo por parte de la planta del cacao, es decir, el proceso por el cual estos metales pesados son movilizados a través del suelo y posteriormente adsorbidos por las raíces de las plantas hasta llegar a cada una de las partes de estas.

Aquí, es importante tener en cuenta que, según las investigaciones recuperadas, se destaca que más allá de la introducción de los metales pesados por medio de los fertilizantes, el uso de pesticidas y la contaminación atmosférica, una de las partes más importantes del proceso de movilización es la capacidad de retención en la matriz del suelo que procederá a la adsorción de las partículas en donde entrarán a actuar factores como los nombrados anteriormente (Marrugo-Negrete et ál., 2017). Además, las investigaciones destacan que una vez que el cadmio y el plomo están presentes en la solución del suelo y son absorbidos por las raíces en las plantaciones, se produce el transporte a las hojas y frutos, lo cual en exceso puede generar acumulación en los tejidos y afectar el desarrollo y crecimiento (Fonseca, 2021).

En suma, los estudios que incluyen estos procesos de digestión incluyen a su vez técnicas de digestión ácida en donde por medio de la mezcla de las muestras tomadas con ácidos fuertes como el ácido nítrico (HNO_3) y ácido clorhídrico (HCl), se logran disolver los componentes orgánicos obteniendo así la liberación de los metales pesados, en donde el HNO_3 permitirá la oxidación de la materia orgánica y el HCl la solubilización de los metales pesados (Ramos et ál., 2022). Este proceso permitirá posteriormente la medición de la concentración de Cd y Pb en la solución obtenida ya sea por técnicas como la espectroscopia de absorción atómica (Rosales et ál., 2020) o espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (Pinzón, 2015).

Según los estudios recuperados, seguido de todos estos análisis de tipo químico y físico, es necesario proceder con el establecimiento y comparación de los límites máximos permisibles, los cuales varían dependiendo la zona de estudio y la localización de la planta cómo es posible visualizar en la tabla 2, ya que estos límites son establecidos por las autoridades de salud y seguridad alimentarias. En el caso de Colombia, a pesar de que cada una de las investigaciones propone un límite permisible según el requerimiento de la investigación el control y medición de estos metales pesados no debe superar los 0,6 mg/kg en el caso del cadmio en cacao seco y los 3,0 mg/kg al hablar del plomo, en donde el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) es la entidad encargada de monitorear y verificar que estos límites no sean superados al hablar de los productos derivados y del cacao para la venta (Aguirre et ál., 2020).

Es importante destacar que en el país se han identificado áreas de plantaciones de cacao con suelos altamente contaminados con cadmio y plomo en especial al hablar de las regiones

mineras y urbanas, modificando la movilidad de los metales dependientes de los factores químicos enunciados con anterioridad. Por otra parte, al hablar de las hojas de las plantas de cacao, pueden clasificarse como uno de los principales reservorios de metales pesados en las plantas, siendo una de las partes en donde se encuentran niveles de Cd y Pb elevados, situación que se relaciona de manera directa con la actividad del suelo (Merchán, 2022).

Sin embargo, al hablar del fruto que sería el principal medio de transmisión de los metales al cuerpo humano por consumo, la movilidad se puede ver dependiente de la concentración en el suelo, las condiciones climáticas y las prácticas del cultivo, por lo que índices elevados pueden afectar la calidad del producto y la seguridad alimentaria en el país, en especial teniendo en cuenta que el cacao es un cultivo fundamental en términos económicos y culturales. Además, con relación a los lixiviados y la filtración a través del suelo hasta la llegada a las plantaciones, puesto que el territorio posee gran cantidad de ríos y arroyos, la contaminación por metales pesados en el suelo hasta el fruto se ve altamente favorecida (Joya et ál., 2023).

En consecuencia, se debe iniciar la implementación de las buenas prácticas agrícolas con el propósito de reducir las fuentes de contaminación en las plantaciones de cacao en donde se expresa la regulación del uso de fertilizantes y pesticidas, la rotación de cultivos y las técnicas de riego. Sin embargo, esto debe estar acompañado de la capacitación constante a los productores puesto que son ellos los que pueden mediar y regular el uso de las buenas prácticas cumpliendo con ellas en materia de seguridad alimentaria (Díaz y Sierra, 2018).

Ahora bien, finalizando con las metodologías empleadas en los diversos documentos para la programación de mantenimientos y control de movilizados de cadmio y plomo, es permitiente emplear la información obtenida en la tabla 1 y 2 para analizar las fortalezas y limitaciones de los diferentes estudios con el objetivo de discutir los resultados sobre dichas metodologías, facilitando los procesos experimentales de movilidad de estos metales pesados.

Primeramente, al hablar de las fortalezas de las investigaciones recuperadas es posible destacar que todas permiten conocer la presencia y concentración de los diferentes metales pesados en especial cadmio y plomo en diferentes secciones morfológicas de las plantas de cacao, lo que permite la identificación de las fuentes de contaminación y todas las áreas críticas. En suma, facilitan el entendimiento de los procesos de movilidad y acumulación de Cd y Pb tanto en la planta como en el suelo, lo que facilita el diseño de estrategias de prevención y control, destacando las correlaciones de las diferentes variables fisicoquímicas con los procesos de movilidad (Merchán, 2022).

Adicionalmente, los estudios entre sus resultados principales favorecen la selección de los lugares aptos para plantaciones con producción de fines comerciales, lo que se relacionará con los límites máximos permisibles por cada metal o con los componentes del suelo en referencia con las texturas, porosidad, fertilidad, solidez y variabilidad, generando así datos valiosos para la toma de decisiones en la promoción de prácticas más sostenibles y saludables en la producción y consumo de cacao por medio del desarrollo de tecnologías y estrategias de reducción (Furcal y Torres 2020).

Sin embargo, al visualizar las limitaciones es posible destacar que se presenta de manera constante la necesidad de análisis de las fuentes de cadmio y plomo por medio de estudios de disponibilidad hídrica, precipitaciones, facilidad de infección, porcentajes de transferencia al fruto,

porcentajes de secuestro de metales y de los cultivos acompañantes. Adicionalmente, este tipo de estudios de análisis de movilidad de metales requiere de monitoreos constantes en las zonas de estudio respecto a las condiciones fisicoquímicas, para evitar de esta manera la presencia de metales que puedan llegar a afectar la salud (Antolínez et ál., 2020).

Conclusiones

El análisis de los diferentes aspectos relacionados con la movilidad del cadmio y plomo en las plantaciones de cacao en América Latina con limitación temporal a los años 2018-2023 ha demostrado ser un tema complejo y multidisciplinario, puesto que estos estudios han permitido tener una mejor comprensión de la presencia y movilidad a pesar de los desafíos por presentar. A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes del presente estudio relacionado al análisis de la movilidad del cadmio y plomo en suelos, hojas frutos y lixiviados en plantaciones de cacao en América Latina.

En primera instancia, es posible concluir que a nivel general, en la comunidad científica existe una preocupación latente por la presencia de cadmio y plomo en las plantaciones de cacao, lo que se traduce en la publicación constante de estudios referentes a la movilidad de estos metales en especial en los últimos años, en donde las tecnologías de detección se han ampliado de manera significativa, facilitando y disminuyendo los tiempos de análisis de las muestras, lo que acelerará los procesos de toma de decisiones para la sostenibilidad y búsqueda de seguridad alimentaria.

Con respecto a la identificación y caracterización de los estudios, es necesario resaltar que los 12 estudios seleccionados permitieron el análisis del cadmio y plomo en las plantaciones de cacao, en especial al realizar un enfoque en países como Colombia y Perú, lo que ha permitido la cooperación internacional y entre países productores de cacao para la implementación de medidas preventivas y correctivas para la reducción de movilidad de cadmio y plomo, promoviendo a su vez el uso de buenas prácticas de agricultura.

Adicionalmente, la movilidad del cadmio y del plomo en los diferentes medios estudiados es un problema complejo, ya que depende de múltiples factores como la acidez del suelo, la textura de este, la zona de plantación, el uso de fertilizantes y pesticidas y la parte de la planta, lo que puede modificar los resultados obtenidos en relación con los límites máximos permisibles los cuales también pueden modificar en relación con el territorio.

Finalmente, a nivel Colombia, es pertinente concluir que el territorio ha establecido límites permisibles para la presencia de estos metales pesados en los granos de cacao destinados a la exportación y la distribución nacional, haciendo necesaria la instauración de medidas de control de la presencia en los cultivos. No obstante, los desafíos en la implementación de estas medidas y en la vigilancia de la calidad del cacao, no han dejado de persistir, haciendo necesaria la duplicación de esfuerzos para que existan inversiones mayores en la investigación y monitoreo que permitan comprender la dinámica de movilización y su impacto en la salud y el medio ambiente.

Referencias

- Agudelo, G., Cañar, D., Gáfar, M., Hernández, J., y Pabón, M. (2021). *Manual técnico para la producción de semilla de cacao en vivero para los Santenderes y Boyacá*. Mosquera: Agrosavia.
- Aguirre, S., Piraneque, N., y Vasquez, J. (12 de 2020). Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena Department Colombia: Emphasis in cadmium. *Ciencia y Tecnología*, 16(2), 298-310. Recuperado el 17 de 08 de 2023, de <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/6753/6037>
- Alloway, B. J. (2013). Heavy Metals and Metalloids as Micronutrients for Plants and Animals. *EPOL*, volume 22, 195-209.
- Antonilez, E., Almanza, P., Barona, A., Polanco, E., y Serrano, P. (04 de 04 de 2020). Estado Actual de la Cacaocultura: Una Revisión de sus Principales Limitantes. *Ciencia y Agricultura*. doi:10.19053/01228420.v17.n2.2020.10729
- Araque, O., Cortéz, L., Lopez, C., Vera, L., y Fuentes, E. (2020). Cadmium, lead, nickel and arsenic analysis, in cocoa plants and cocoa products: Food Industry. *CienciAmérica (2020) Vol. 9 (4)*, 15-23.
- Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica* (6 ed.). Caracas: Editorial Episteme.
- Baptista, C. J., Seixas, F., Orden, J. G., y Oliveira, P. (2022). Biomonitoring of heavy metals and metalloids with wild mammals in the Iberian Peninsula: a systematic review. *Environmental Reviews. e-First*, 16-22.
- Baptista, P., Fernández, C., y Hernández, R. (2010). *Metodología de la Investigación* (5 ed.). Mc Graw Hill.
- Bravo, D., León, C., Quiroga, R., Zamora, A., Gutierrez, E., Moreno, E., . . . Guerra, B. (2021). *¿Qué es cadmio y por qué es importante en el cultivo de cacao?* Bogotá: Agrosavia V(1).
- Bravo, D., León-Moreno, C., Quiroga, R., Zamora, A., Gutiérrez, E., Moreno, E., . . . Guerra-Sierra, B. (2021). *¿Qué es el cadmio y por qué es importante en el cultivo de cacao?* Bogotá: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia).
- Cacao Movil. (12 de agosto de 2019). *Cacao Movil*. Obtenido de Cacao Movil: <https://cacaomovil.com/site/guide/produccion-de-plantas-de-cacao-en-vivero/20/la-produccion-de-plantas-en-vivero>
- Castebianco, J. (2018). Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La Grnaja. Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1), 21-35. doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>
- Dach, J., y Starmans, D. (2005). *Heavy metals balance in Polish and Dutch agronomy: Actual*. Georgia-USA: Ecosystems y Environment.
- FAO. (2014). *Agricultura Familiar en América Latina y El Caribe*. Santiago: Salcedo y Guzmán.
- Figueredo, D., y Pinto, N. (2016). Plan de manejo ambiental para mitigar los impactos generados por la explotación minera en el municipio de Nechí en el Bajo Cauca. Región de La Mojana. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Florez, L. A., y Gomez, J. (03 de 2019). *Determinación de los niveles de cadmio en suelos de plantaciones de cacao (Theobroma cacao L.) ubicadas en la vereda La Esmeralda en el municipio de San Vicente de Chucuri, Santander*. Recuperado el 15 de 08 de 2023, de http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/2111/1/FI%C3%B3rez_G%C3%B3mez_2019_TG.pdf

- Fonseca, J. (2021). *Metales pesados (Cd++, Pb++) en granos de cacao (Theobroma cacao) y la fitoextracción de cultivos en callejones, valle del alto huallaga - Perú*. (M. L. Cernades, Ed.) Recuperado el 21 de 08 de 2023, de <https://repositorio.unheval.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13080/6885/PGA00120F74.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Forbes. (7 de febrero de 2023). *Forbes Colombia*. Obtenido de Forbes Colombia: <https://forbes.co/2023/02/07/economia-y-finanzas/la-produccion-del-cacao-en-colombia-disminuyo-un-10-en-2022>
- Gómez, D., Crranza, Y., y Ramos, C. (2017). Revisión documental, una herramienta para el mejoramiento de las competencias de lectura y escritura en estudiantes universitarios. *Revista Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades*(1).
- Guevara, G., Verdesoto, A., y Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *recimundo. Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 4(3), 163-173. doi:10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173
- Huamaní-Yupanqui, H., Huauya-Rojas, M., Mansilla-Minaya, L., Florida-Rofner, N., y Neira-Trujillo, G. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta Agronómica*, 61(4), 339-344.
- INIAP. (2019). La Cadena de Valor del Cacao en América Latina y El Caribe. *Fontagro*, 5-8. Obtenido de Colombiaco.
- IPNI. (20 de marzo de 2015). *IPNI CANADA*. Obtenido de IPNI: <http://nla.ipni.net/article/NLA-3112>
- Joya, V., Huguet, C., y Pearse, J. (2023). Natural and Anthropogenic Sources of Cadmium in Cacao Crop Soils of Santander, Colombia. *Soil Systems*, 7(12). doi:<https://doi.org/10.3390/soilsystems7010012>
- Loria, K. (6 de 1 de 2023). El plomo y el cadmio podrían estar en tu chocolate oscuro. *CR Costumer Reports*.
- Merchán, K. S. (23 de 05 de 2022). *Variación en el contenido de cadmio en cultivos de cacao (theobroma cacao) en pauna y coper (boyacá – colombia). Análisis desde la diversidad de las comunidades vegetales*. Recuperado el 21 de 08 de 2023, de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/61259/Cadmio-Cacao.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morales, E. A., Llano, X. G., y Angulo, D. R. (2021). Análisis de los efectos que produce la presencia del cadmio en el cultivo de cacao. *Riinn -revista ingeniería e innovación*, 50-52.
- Moreno, C. L., Rojas, J., Palencia, G., Mantilla, J., Mateus, H., Castilla, C., . . . Caicedo, A. (2008). *Contenido total y niveles de disponibilidad de los metales pesados cadmio, mercurio, arsénico y plomo e impacto sobre la calidad del grano en suelos productores de cacao (Theobroma cacao L.) de Colombia. – 2008- 2012*. Bogotá-Colombia: CorPoiCA.
- Moreno, M. (2022). Aplicación de técnicas de fitorremediación en suelos contaminados con plomo y cadmio. *Conciencia Digital*, 30-43.
- OK Diario. (23 de enero de 2023). *OKDIARIO*. Obtenido de Ok Diario Economía: <https://okdiario.com/economia/alerta-supermercados-peligro-presencia-plomo-cadmio-conocidas-marcas-chocolate-10336936#:~:text=Lily's%20%E2%80%93%20Chocolate%20negro%2070%25%3A,plomo%20y%2080%25%20de%20cadmio.>

- Oliva, M., Rubio, K., Epquin, M., Marlo, G., y Leiva, S. (11 de 10 de 2020). Absorción de Cadmio en Árboles Nativos de Cacao en Tierras Agrícolas de Bagua, Perú. *Agronomy*, 10(10), 1551. doi:doi:10.3390
- Peláez-Peláez, M., Bustamante, J., y Gómez, E. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena Medio colombiano. *Luna Azul*(43), 82-101. doi:https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.5
- Pérez, D. F. (2014). Consideraciones ambientales y viabilidad socioeconómica del sistema productivo del cacao. El caso de los agricultores de Pueblo Bello, Departamento del Cesar. *Facultad de estudios ambientales y rurales pontificia universidad javeriana*, 25-38.
- PNUMA. (2003). *Geo américa latina y el caribe - Respectivas del medio ambiente*. Costa Rica: Programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA).
- Prieto, J., González, C., Román, A., y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Quiceno, J. (2022). En Santander encuentran un hongo que protegería al cacao de un metal tóxico. *El Espectador*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/ciencia/en-santander-encuentran-un-hongo-que-protegeria-al-cacao-de-un-metal-toxico/>
- Quiroz, J., y Mestanza, S. (2012). *Establecimiento y manejo de una plantación de cacao*. Quito: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias.
- Ramos, C., Ruales, J., Rivera, J. L., Sakakibara, M., y Diaz, X. (03 de 11 de 2022). Sostenibilidad del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en el distrito minero de Ponce Enríquez: un enfoque de trazas de metales. (R. A. Lord, Ed.) *PubMed Central*, 19(21). doi:10.3390/ijerph192114369
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., y González, E. (2016). Heavy metals contamination: implications for health and food safety. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77.
- Rofner, N. F. (2021). *Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and South American origin* (Vol. 74). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Recuperado el 20 de 08 de 2023, de <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
- Rosales, J., y Breña, J. L. (08 de 09 de 2020). Estudio para Determinar Niveles de Cadmio en Cultivos de Cacao Aplicado al Interior del Perú: “El Caso del Corredor Campo Verde-Honorio Tournavista. *agronomy*, 10(10), 1576. Recuperado el 20 de 08 de 2023, de <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/10/1576>
- Rosales, J., Centeno, L., Cajacuri, J. B., y Chavez, C. (06 de 2021). Identification of cadmium and lead in cocoa crops located in the satipo - junin zone. *Revista TECNIA*, 31(2), 83-89. Recuperado el 21 de 08 de 2023, de <http://www.scielo.org.pe/pdf/tecnia/v31n2/2309-0413-tecnia-31-02-83.pdf>
- Silva, P. (2019). Análisis comparativo de los niveles de cadmio en el suelo Aquiz Dystropepts, Fluventic Dystropepts y una pradera con pastura en reposo de la Vereda Rincón de Pompeya, Villavicencio, Meta. Villavicencio, Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Somarriva, E., Cerda, R., Quesada, F., Astorga, C., Orozco, L., Villalobos, M., . . . Deheuvels, O. (2011). *El ciclo de vida y el manejo del cacaotal*. Turribial - Costa Rica: CATIE- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Tobón, C. J. (2015). Global legal status of cadmium in cacao (*Theobroma cacao*): a fantasy or a reality. *Scielo*, 89-104.

- Torres, J. L., y Furcal, P. (03 de 2020). Determination of cadmium concentrations in cocoa plantations (*Theobroma cacao* L.) in Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137. Recuperado el 16 de 08 de 2023, de <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- Valencia, V. (2020). Revisión documental en el proceso de investigación. Obtenido de <https://univirtual.utp.edu.co/pandora/recursos/1000/1771/1771.pdf>
- Vásquez-Barajas, E., García-Torres, N., Bastos-Osorio, L., y Lázaro-Pacheco, J. (2018). Análisis económico del sector cacaotero en Norte de Santander, Colombia y a nivel internacional. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2). doi:<https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7963>
- Veiga, J., de la Fuente, E., y Zimmermann, M. (2008). Modelos de estudios en investigación aplicada: conceptos y criterios para el diseño. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, 54(210).
- Véliz, D. V., Chang, J. V., Jácome, G., y Cabrera, R. (2017). Guía para el establecimiento y manejo de un vivero de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Universidad Técnica Estatal de Quevedo*, 24-39.
- Vivar, C., McQueen, A., Whyte, D., y Canga, N. (2013). Primeros pasos en la investigación cualitativa: desarrollo de una propuesta de investigación. *Índex de Enfermeria*, 22(4). doi:<https://dx.doi.org/10.4321/S1132-12962013000300007>
- Yupanqui, H. A., Rojas, M. á., Minaya, L. G., Rofner, N. F., y Neira-Trujillo, G. M. (2012). Presence of heavy metals in organic cacao (*Theobroma cacao* L.) crop. *Acta Agron. vol.61 no.4 Palmira* , 339-344.
- Zúñiga, F. B. (1999). Introducción al estudio de la contaminación. *FMVZ, UADY* , 23-41.