



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera en
Biotecnología*

TRABAJO EXPERIMENTAL

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ANTROPOGÉNICA POR AS, CD
Y FE EN DOS AGROECOSISTEMAS BANANEROS PARA MEJORAR LAS
BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS**

AUTOR: STEVEN JAIR CARPIO GALLEGOS

**TUTORES: NELLY LORENA PULGAR OLEAS
JAIME ALBERTO NARANJO MORAN**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2023

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Steven Jair Carpio Gallegos con documento de identificación N° 0930600861, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ANTROPOGENICA POR AS, CD, Y FE EN DOS AGROECOSISTEMA BANANEROS PARA MEJORAR LAS BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS**, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera en Biotecnología*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor, me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que entrego el trabajo en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, septiembre del 2023



Steven Jair Carpio Gallegos

C.I. 0930600861

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación:

**EVALUACION DE LA CONTAMINACION ANTROPOGENICA POR AS,
CD, Y FE EN DOS AGROECOSISTEMA BANANEROS PARA MEJORAR
LAS BUENAS PRACTICAS AGRICOLAS**, realizado por Steven Jair Carpio
Gallegos, obteniendo el *Trabajo Experimental*, que cumple con todos los requisitos
estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, septiembre del 2023



Nelly Lorena Pulgar Oleas
C.I. 0602420911

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Steven Jair Carpio Gallegos con documento de identificación N° 0930600861, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del trabajo de titulación: **EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ANTROPOGENICA POR AS, CD, Y FE EN DOS AGROECOSISTEMA BANANEROS PARA MEJORAR LAS BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS**, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniera en Biotecnología*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor, me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que entrego el trabajo en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, septiembre del 2023



Steven Jair Carpio Gallegos

C.I. 0930600861

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Steven Jair Carpio Gallegos con documento de identificación N° 0930600861, autor del trabajo de titulación: **EVALUACION DE LA CONTAMINACION ANTROPOGENICA POR AS, CD, Y FE EN DOS AGROECOSISTEMA BANANEROS PARA MEJORAR LAS BUENAS PRACTICAS AGRICOLAS,**

certifico que el total contenido del *Trabajo Experimental* es mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, septiembre del 2023



Steven Jair Carpio Gallegos

CI: 0930600861

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar siempre a mi lado y llenarme de sabiduría

A mi padre Jair Carpio y a mi madre Dorita Gallegos por apoyarme siempre en los malos y buenos momentos

Al Ing. Jaime Naranjo, que me ha brindado su tiempo y sus conocimientos a lo largo de este proyecto de investigación

You belong with me

RESUMEN

La aparición de metales pesados tóxicos en el entorno del cultivo de banano en Ecuador plantea una amenaza significativa para la sostenibilidad de su producción. Ecuador desempeña un papel destacado en la producción de esta valiosa fruta, esencial para la nutrición humana, el propósito central de este estudio fue examinar de qué manera la concentración de tres metales pesados perjudiciales (Arsénico, Cadmio y Hierro) afecta a un agroecosistema bananero en el país.

El enfoque de la investigación principal se dirigió a investigar las repercusiones de la concentración de estos metales tóxicos en el cultivo de banano, Para ello, se empleó un diseño experimental ex post facto. Se procedió a la cuantificación precisa de los tres metales nocivos en muestras de hojas, raíces, suelos y frutos. Este proceso de análisis contribuyó a comprender de manera integral la distribución, acumulación de los metales en diversas partes de las plantas y el entorno del cultivo.

Este estudio busca arrojar luz sobre el problema relacionado con la contaminación a causa de metales de alta densidad en la producción de banano en Ecuador y suministrar datos útiles que puedan influir en la toma de determinaciones en la gestión de agroecosistemas.

Palabras clave: *Banano; Metales pesados; Remediación de suelo.*

ABSTRACT

The contamination of toxic heavy metals poses a risk to the sustainability of banana fruit production. Ecuador is a leading country in the production of this fruit, which is crucial for human nutrition. The objective of this research was to assess the impact of the concentration of three toxic heavy metals (As, Cd, and Fe) in a banana agroecosystem in Ecuador.

Toxic contaminants were evaluated before and after the application of calcium sulfate through an *ex post facto* experimental design. The quantitative determination of the three toxic metals was carried out on samples of leaves, roots, soil, and fruits, using a comprehensive analysis to understand the distribution and accumulation of metals in different parts of the plants and the cultivation environment.

This study aims to shed light on the issue of heavy metal contamination in Ecuador's banana production and provide valuable insights for decision-making in agroecosystem management.

Keywords: Banano; Heavy Metal; Soil Remediation

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
Antecedentes	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Formulación del problema	5
1.4 Justificación de la investigación.....	5
1.5 Delimitaciones.....	6
1.5.1 Localización.....	6
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo general	7
1.6.2 Objetivos específicos	7
1.7 Hipótesis	8
Capítulo 2	9
Marco teórico	9
2.1 El cultivo de banano	9
2.2 Cadmio	10
2.3 Arsénico	11
2.4 Hierro	11
2.5 Fuentes y causas de contaminación	12

Capítulo 3	14
Materiales y métodos	14
3.1 Ubicación de las plantaciones	14
3.2 Tipo de investigación experimental	15
3.3 Recolección de muestras en el agroecosistema bananero	15
3.3.1 Suelo	15
3.3.2 Raíz, hojas y frutos.....	16
3.3.3 Recursos.....	17
3.4 Proceso de digestión	17
3.5 Proceso de secado	18
3.6 Proceso de obtención de muestra	19
3.7 Protocolo de digestión de muestra	19
3.8 Análisis de datos estadísticos	21
Capítulo 4	22
Resultados y discusión	22
4.1 Discusión	25
4.2 Protocolo de mitigación del cultivo bananero	30
Capítulo 5	31
Conclusiones y recomendaciones	31
5.1 Conclusiones	31

5.2 Recomendaciones	32
<i>Bibliografía</i>.....	33
<i>Anexos</i>	40

Índice de tabla

Tabla 1. Contaminación de As, Cd y Pb en agroecosistema bananero, Matriz CDIU	20
Tabla 2 Acumulación de As, Cd y Fe en agroecosistema de banano orgánico y convencional	22
Tabla 3 Factores de translocación y bioacumulación de As, Cd y Fe en dos agroecosistemas	24
Tabla 4 Observaciones y soluciones propuestas para los metales pesados en agroecosistemas bananeros	28
Tabla 5 Concentración de metales en la fruta del banano en la plantación orgánica.....	40
Tabla 6 Concentración de metales en la fruta del banano en la plantación convencional	40
Tabla 7 Concentración de metales en la raíz de banano de la plantación Orgánica	40
Tabla 8 Concentración de metales en la raíz de banano en la plantación Convencional.....	41
Tabla 9 Concentración de metales en la hoja de banano en la plantación Convencional.....	41
Tabla 10 Concentración de metales en la hoja de banano en la plantación Orgánica	42

Índice de figuras

Figura 1	Mapa de muestreo	7
Figura 2	Planta de banano	10
Figura 3	Recolección de muestra	43
Figura 4	Proceso de digestión de muestra	44
Figura 5	curva de calibración	45

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Introducción

El Ecuador se destaca como una nación fuerte de base agrícola, donde el banano desempeña un papel central en los principales productos de exportación. La extensión dedicada al cultivo de banano en el país abarca unas 158.056 hectáreas, con una concentración notable en las regiones de Los Ríos, El Oro y Guayas, que en conjunto representan un 82,39% del área total de agroecosistema bananero (INEC, 2021).

Los fertilizantes, agroquímicos y otros productos son utilizados en la producción de frutas de banano representa una de las causas de contaminación por metales pesados (Sahodaran & Ray, 2018).

La excelencia de la fruta se convierte en un factor fundamental al realizar exportaciones hacia el mercado europeo y de Estados Unidos. Estos mercados demandan productos que cumplan con todas las regulaciones establecidas para garantizar que no representen riesgos para la salud de las personas y bien recibidos en términos comerciales. No obstante, existe el riesgo de que la fruta de banano pueda contaminarse con metales pesados que podrían provocar toxicidad en los consumidores.

La tecnología actual ha proporcionado herramientas de alta precisión para la detección de metales pesados en el suelo y en los tejidos de las plantas. Entre estas tecnologías se encuentra el equipo ICP-OES se destaca como un método analítico utilizado en el ámbito de investigación de la científica.

La acumulación de As, Cd y Fe en suelos contaminados, puede tener consecuencias adversas para la salud de las personas. Se ha notado que los niños son más susceptibles a estos metales pesados en comparación con los adultos. La exposición a largo plazo a niveles elevados de As, Cd y Fe puede resultar en una serie de problemas de salud en los seres humanos. La principal fuente que conduce a casos adicionales de exposición humana mensurable a metales pesados es la inhalación de partículas contaminadas en el entorno industrial. Los efectos en la salud que pueden abarcar trastornos cardiovasculares, deterioro neurológico, daño renal, un incremento en el conflicto de desarrollar afecciones como el cáncer y la diabetes (Li et al., 2023). El As puede ocasionar daños en el sistema nervioso, trastornos respiratorios, cardiovasculares y aumentar el riesgo de cáncer. Las distintas especies de As presentan diferentes niveles de toxicidad, donde los compuestos inorgánicos muestran una mayor toxicidad en comparación con los orgánicos, y dentro de los compuestos trivalentes se observa una toxicidad superior a la de los compuestos pentavalentes (Medina et al., 2018). Por otro lado, el Cd se lo ha asociado con daños renales, problemas óseos y trastornos del sistema respiratorio. El Fe puede afectar el desarrollo del sistema nervioso en los niños, causar daños cerebrales, retrasos cognitivos y afectar la función renal (Balali et al., 2021).

Dada la preocupación por los efectos de estos metales pesados en la salud humana, es de suma importancia implementar medidas adecuadas para controlar y gestionar la contaminación del suelo. Así mismo, es esencial promover prácticas agrícolas seguras y llevar a cabo una supervisión constante de las cantidades de metales pesados presentes en los alimentos y el agua. Con esto, podremos asegurar la

preservación de la salud pública y el bienestar de la sociedad.

Por otro lado, Las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) buscan optimizar la producción de banano de manera sostenible y segura, garantizando la calidad del producto final y minimizando los impactos negativos en el medio ambiente y en la salud del trabajador. Estas prácticas están diseñadas para abordar diversos aspectos del cultivo, desde la preparación del suelo hasta la cosecha y el manejo postcosecha. Las Buenas Prácticas Agrícolas comprenden un conjunto de directrices, fundamentos y sugerencias técnicas que se implementan en las diversas etapas de la producción agrícola (AGROCALIDAD, 2020).

Un agroecosistema orgánico se caracteriza por utilizar técnicas de producción que evitan. En lugar de recurrir a sustancias químicas sintéticas, como pesticidas, herbicidas y fertilizantes, se emplean enfoques naturales, tales como la rotación de cultivos, la aplicación de fertilizantes orgánicos, el control biológico de plagas y enfermedades, entre otros. Este tipo de cultivo busca mantener la fertilidad del suelo a largo plazo, preservar la biodiversidad y promover la salud de los consumidores, por lo que la mayoría de los productos orgánicos suelen estar libres de residuos químicos (Tonolli et al., 2019).

Por otro lado, los agroecosistemas convencionales utilizan técnicas de producción intensiva, que incluyen el uso de productos químicos sintéticos para controlar plagas y enfermedades, acelerar el crecimiento de los cultivos para aumentar su rendimiento del cultivo. Este tipo de cultivo tiende a agotar los nutrientes del suelo y deteriorar la calidad del agua y del aire, además de contribuir a la pérdida de biodiversidad en el entorno (Tonolli et al., 2019).

1.2 Planteamiento del problema

La industria bananera en Ecuador es un componente esencial de la economía del país y se destaca como uno de los principales exportadores globales de esta fruta. No obstante, el aumento en la intensidad de las actividades agrícolas y la utilización de agroquímicos han generado preocupaciones sobre la contaminación antropogénica en los agroecosistemas, lo que podría tener impactos significativos en la salud ambiental y humana. La presencia de metales pesados como As, Cd y Fe en suelos y tejidos vegetales puede ser resultado de las actividades humanas, dado que amenaza para la calidad del suelo, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de la producción bananera (Burbano, 2016).

La acumulación de As y Cd en los suelos agrícolas proviene de diversas fuentes contaminantes, como la aplicación de fertilizantes, el uso de pesticidas y la liberación de aguas residuales contaminadas. Estos metales pesados tienen la capacidad de persistir en el ambiente durante largos períodos, acumulándose en los suelos, pasando a través de la cadena alimentaria hasta llegar a los consumidores finales. Por otro lado, el Fe, aunque es un nutriente esencial para las plantas y los seres humanos, también puede presentar riesgos cuando se acumula en niveles excesivos en el suelo, puede ser un enemigo silencioso (Naciones Unidas, 2023).

A pesar de la relevancia económica y ambiental de la industria bananera en Ecuador, existe una necesidad crítica de evaluar y comprender la magnitud de la contaminación antropogénica por As, Cd y Fe en los agroecosistemas dedicados al cultivo del banano. Los análisis de metales pesados permitirán identificar el

grado de exposición en los cultivos, el suelo como base referente para evaluar los riesgos potenciales en la salud humana y ambiental, se recomienda proponer estrategias de gestión y mitigación que garanticen la sostenibilidad a largo plazo de la producción bananera con el fin de aportar a la seguridad alimentaria de la población.

En este contexto, se plantea la presente investigación con el propósito de analizar la contaminación antropogénica de As, Cd y Fe en dos estilos de agroecosistemas bananeros en el Ecuador, con el fin de contribuir al conocimiento científico sobre la presencia de metales pesados en esta área y proporcionar datos significativos para la toma de decisiones en políticas agrícolas y ambientales.

1.3 Formulación del problema

¿De qué manera puede la presencia de los metales pesados As, Cd y Fe afectar la nutrición del cultivo de banano convencional y orgánico en la finca Bella Esmeralda y San José, ubicadas en el cantón Milagro provincia del Guayas?

1.4 Justificación de la investigación

El presente estudio de investigación busca analizar la presencia y concentración de los metales pesados As, Cd y Fe en Bella Esmeralda, ubicada en Milagro. Dichas haciendas carecen de investigaciones previa en esta área, lo que podría contribuir a la mejora de la calidad de sus productos y servicios al demostrar conformidad con las normas de calidad tanto nacionales como internacionales. Así mismo, se busca identificar los potenciales riesgos que los metales pesados que puedan generar en los cultivos intensivos de banano y en la salud de los consumidores, considerando que Ecuador es uno de los principales exportadores a nivel mundial.

Además de su impacto en el ámbito académico, este estudio también beneficia al sector bananero. Proporcionando una mayor comprensión acerca del uso de las buenas prácticas agrícolas en la producción de banano y las medidas ambientales adoptadas. Este conocimiento actualizado permitirá a futuras generaciones retroalimentar los datos de trazabilidad y movimiento de estos elementos en la interacción suelo-planta para contribuir al desarrollo sostenible de la agroindustria.

1.5 Delimitaciones

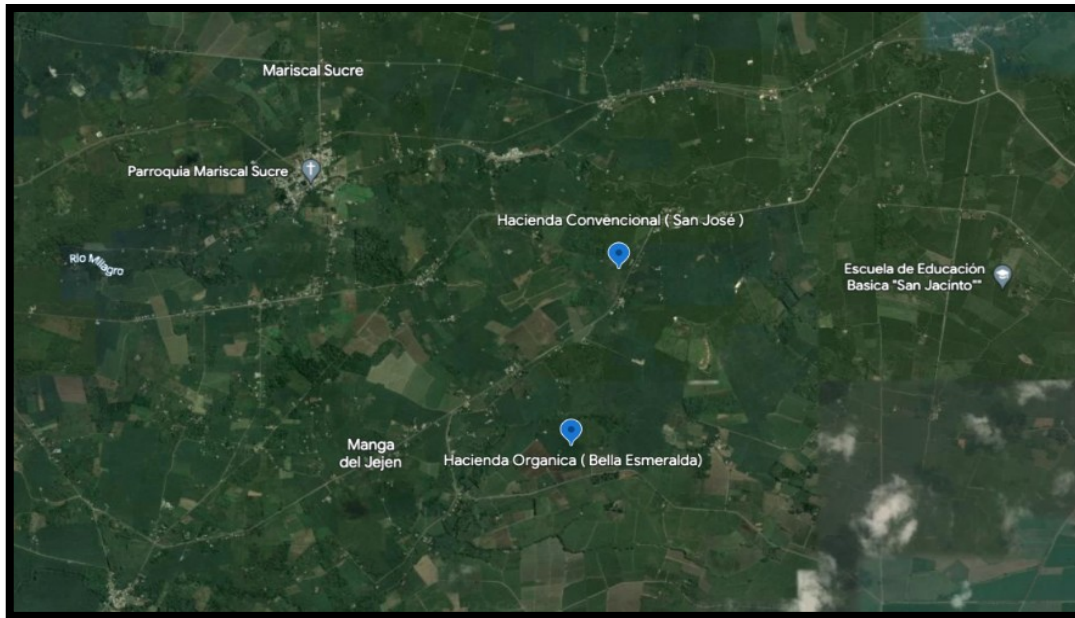
1.5.1 Localización de las plantaciones bananera en estudio

Las muestras de banano convencional fueron recolectadas en la hacienda Bella Esmeralda, ubicada en el Recinto Vuelta del Piano, y la muestra de banano orgánico fue colectada en la hacienda San José del Recinto Galápagos ambas en la Parroquia Roberto Astudillo, del Cantón Milagro- Provincia del Guayas, con las siguientes coordenadas geográficas de la finca convencional son 2°07'04.8"S 79°28'38.2" las coordenadas de la finca orgánica son 2°8'3.81"S 79°28'58.78"W.

Las muestras de banano orgánico se recolectaron en la hacienda San José ubicado en el Recinto Galápagos (ver figura 1).

Figura 1:

Mapa de muestreo



Fuente: Google maps, 2023

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general.

Evaluar la acumulación de metales pesados (As, Cd, y Fe) en dos plantaciones bananeras en Guayas – Ecuador.

1.6.2 Objetivos específicos.

- Cuantificar la absorción de metales pesados presente en el cultivo de banano.
- Determinar los factores de bioacumulación y translocación de metales pesados en el cultivo de banano.

1.7 Hipótesis

- La intensidad del uso de agroquímicos y pesticidas en el cultivo de banano en el agroecosistema de Ecuador relacionada con las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd) y hierro (Fe) en el suelo y los tejidos vegetales. Cuanto mayor sea la cantidad y frecuencia de aplicaciones de agroquímicos, mayores serán las concentraciones de metales pesados en el entorno agrícola.

- La gestión inadecuada de residuos generados durante el proceso de producción del banano contribuye a la liberación de arsénico (As), cadmio (Cd) y hierro (Fe) en el entorno del agroecosistema. La falta de prácticas de manejo y eliminación de residuos adecuadas resulta en la dispersión de metales pesados en el suelo y el agua, aumentando la contaminación del entorno.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 El cultivo de banano

El banano es una planta perenne que pertenece a la familia de las Musáceas. Es originario de regiones tropicales y se cultiva en todo el mundo por su delicioso sabor y alta demanda en la industria alimentaria. La planta del banano presenta un tallo subterráneo llamado rizoma, del cual emergen varias hojas grandes y alargadas que forman lo que se conoce como falso tronco. Además, suele alcanzar una altura de hasta nueve metros y cada hoja puede llegar a medir tres metros de largo y 60 centímetros de ancho (Soriano, 2019).

El banano se reproduce por medio de rizomas, que generan nuevos brotes que crecen alrededor de la planta madre. Estos se separan y plantan para cultivar nuevas plantas (ver figura 2); también se puede reproducir mediante semillas, aunque esta práctica es menos común, debido a que las características de las nuevas plantas pueden ser menos predecibles. En particular, requiere de condiciones climáticas específicas para su crecimiento óptimo, necesita de una temperatura constante de siquiera 27 grados Celsius durante todo el año y un alto nivel de humedad, no tolera las heladas ni las temperaturas altas; a su vez, necesita de suelos ricos en nutrientes, bien drenados y con un pH entre 5.5 y 7.0 (León et al., 2020).

La producción de banano se realiza en grandes plantaciones llamadas bananeras, sus plantas se cultivan en filas y se riegan con frecuencia con el fin de conservar un elevado grado de humedad en el suelo. Se aplican fertilizantes al cultivo para garantizar un adecuado suministro de nutrientes. Una vez que los racimos de banano

están maduros, se cosechan de forma manual cortando el tallo a unos pocos centímetros por encima del racimo. Luego se transportan de forma cuidadosa para evitar dañar los frutos y se colocan en cajas especiales para su transporte y comercialización (Garita, 2022).

Figura 1

Planta de banano



Fuente: Garita (2022)

2.2 Cadmio

El Cd es un elemento químico que pertenece al grupo de los metales de transición, ubicado en el período 5 y el grupo 12 de la tabla periódica. Su símbolo químico es Cd y su número atómico es 48. Aunque no es tan conocido como algunos otros elementos, el Cd desempeña un papel importante en la industria y la tecnología, debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. En la naturaleza, el cadmio no se encuentra en estado libre de forma abundante, en su lugar, se

presenta en forma de minerales asociados con otros como el zinc, el plomo y el cobre. Las principales fuentes de este en el ambiente provienen de actividades humanas, como la minería y el procesamiento de minerales, la producción de baterías recargables de níquel-cadmio, fabricación de pigmentos y plásticos, e incineración de desechos (Naranjo & WingChing, 2023). Asimismo, el consumo de alimentos contaminados con cadmio puede causar daños en los riñones, los pulmones y el sistema cardiovascular, así como provocar trastornos óseos y afectar la función reproductiva. Además, es un metal pesado que tiende a acumularse en las raíces de las plantas mediante la absorción pasiva, y suele ser transportado a través del xilema de la planta hacia las hojas y los frutos. La acumulación de cadmio en las hojas y los frutos depende de varios factores, como la concentración de Cd en el suelo, el pH de este y las características de la planta, entre otros (Zurita, 2020).

2.3 Arsénico

El As es un no metal que se encuentra en el suelo debido a la minería, la agricultura intensiva y algunos procesos industriales, su exposición crónica tiende a causar cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñón; además, suele afectar el sistema nervioso central, provocar daños en los órganos como el hígado y los riñones. Es importante destacar que el As puede acumularse en el cuerpo con el tiempo, lo que aumenta el riesgo de enfermedades graves. A su vez, puede ser absorbido por las raíces y las hojas de las plantas, la filtración de As por las raíces ocurre por medio de la absorción pasiva o activa, dependiendo de las condiciones ambientales. Una vez impregnado, el As se transloca a través de la xilema y del floema hacia las partes superiores de la planta, incluyendo las hojas y los frutos, lo cual depende de su concentración en el suelo y del flujo de nutrientes en la planta (Fowler et al., 2022)

2.4 Hierro

El Fe es un elemento esencial para la vida y despliega un papel fundamental en una variedad de

procesos biológicos. Representado por el símbolo químico Fe y el número atómico 26 en la tabla periódica, el Fe es un metal de transición distribuido en la naturaleza. Sus propiedades magnéticas y su capacidad para formar compuestos diversos hacen que sea crucial tanto para la industria como para la biología (Ning & Zeller, 2019).

Por otro lado, en el contexto agrícola, el Fe es un micronutriente esencial para las plantas. Aunque las plantas necesitan Fe para su crecimiento saludable, la cantidad necesaria es mucho menor en comparación con otros elementos. El Fe se absorbe a través de las raíces en forma de iones ferrosos y se transporta a través de la planta para cumplir sus funciones biológicas. En algunos suelos, la falta de este puede llevar a una condición llamada clorosis férrica, donde las hojas se vuelven amarillas, debido a la deficiencia de clorofila. Para abordar esta deficiencia se aplica fertilizantes que contienen Fe en forma soluble (Schmidt et al., 2020).

El Fe, por otro lado, es un elemento esencial para el organismo humano, pero en altas concentraciones tiende a ser tóxico. La contaminación con hierro en las plantas ocurre, dado a la presencia de minerales en el suelo. Si bien es poco probable que la absorción de hierro por medio de la alimentación cause daños significativos en la salud humana, la ingestión prolongada de altas cantidades de Fe puede causar trastornos gastrointestinales y una acumulación excesiva en el cuerpo. Además, es un micronutriente esencial para las plantas y se absorbe principalmente a través de las raíces. Una vez en las raíces, el Fe tiende a ser transportado a través del xilema hacia las hojas a través de un proceso llamado complicación con compuestos orgánicos, como los ácidos orgánicos. Asimismo, puede translocarse hacia los frutos mediante el floema, donde cumple funciones vitales en diferentes procesos fisiológicos de la planta (Danyu et al., 2021).

2.5 Fuentes y causas de contaminación

El uso de agroquímicos para la aplicación excesiva o inadecuada de agroquímicos como

fertilizantes y pesticidas puede contribuir a la acumulación de metales pesados en el suelo. Los fertilizantes pueden contener trazas de metales pesados y, si se utilizan en cantidades excesivas, estos pueden acumularse con el tiempo. Los pesticidas pueden contener ingredientes que contienen metales pesados o pueden afectar la retención de metales pesados en el suelo, también los desechos y aguas residuales que con la descarga inadecuada de aguas residuales industriales y domésticas en los campos de cultivo puede llevar a la contaminación del suelo y las aguas subterráneas con metales pesados. Los contaminantes pueden ser arrastrados por las aguas y depositados en los suelos utilizados para el cultivo del banano, por último, el procesamiento del banano, la manipulación y actividades relacionadas pueden producir residuos que contienen metales pesados, incluyendo envases de pesticidas y productos químicos. Si la gestión de estos residuos es deficiente, puede dar lugar a la liberación de metales pesados en el medio ambiente circundante (Camargo et al., 2021).

Capítulo 3

Materiales y métodos

3.1 Ubicación de las plantaciones

La elección adecuada de la ubicación de las plantaciones es un aspecto esencial en la agricultura y la silvicultura, esta decisión puede tener un impacto significativo en la productividad y la salud de los cultivos en el agroecosistema. Al seleccionar la ubicación adecuada, se deben considerar diversos factores interrelacionados que influyen en el éxito a largo plazo de las plantaciones. Uno de los factores más influyentes es el clima de la región, por lo cual las condiciones climáticas, como la temperatura y la precipitación, pueden variar de un lugar a otro. La adaptación al clima no solo promueve el crecimiento saludable de las plantas, sino que también puede influir en su resistencia a plagas y enfermedades (Infante, 2020).

La calidad y características del suelo son otro elemento primordial en la selección de la ubicación, diferentes tipos de suelo tienen diversas capacidades de retención de agua, drenaje y nutrientes; evaluar la composición del suelo y su pH puede ayudar a determinar qué tipos de plantas serán más adecuados para una ubicación específica. Algunas plantas prosperan en suelos ácidos, mientras que, otras prefieren suelos alcalinos, el conocimiento profundo del suelo puede mejorar la salud de las plantaciones y la calidad de los productos. En consecuencia, la disponibilidad de agua es un factor determinante para el crecimiento de las plantas, La elección de una ubicación con acceso a fuentes de agua adecuadas es fundamental, para las plantaciones agrícolas que requieren un suministro constante de agua; por otro lado, plantas que son resistentes a la sequía pueden ser una elección acertada en áreas donde el agua es escasa (Toribio & Villalón, 2022).

La topografía del terreno también juega un papel importante en la ubicación de las plantaciones,

terrenos empinados pueden ser desafiantes en términos de manejo y drenaje, lo que puede afectar la salud de las plantas. Por lo tanto, en función de las necesidades y requisitos de las plantaciones, la elección de terrenos planos o más inclinados puede ser determinante para su productividad (Avogadro & Padró, 2019).

3.2 Tipo de investigación experimental

La investigación experimental desarrollada fue de tipo descriptiva correlacional entre los dos agroecosistemas bananeros, en el cual se observa un comportamiento en la variable metales pesados As, Cd y Fe según el estilo de cultivo, además este estudio experimental posee un desarrollo cualitativo para la toma de decisiones dado que se recopiló información de tesis, revistas científicas, libros, boletines y otros, con el fin de argumentar un protocolo de mitigación para los tres metales pesados estudiados. Cabe recalcar que para obtener estos datos no se manipuló ninguna variable de las condiciones existentes en la plantación de banano.

3.3 Recolección de muestras en el agroecosistema bananero

3.3.1 Suelo

El proceso de obtención de muestras del suelo, conforme a la metodología establecida por (AGROCALIDAD, 2020). Respaldada por la norma ISO IEC/17025. En cada unidad de muestreo de hectáreas, se tomaron 15 submuestras, siguiendo un patrón en zigzag. Estas submuestras se obtuvieron a una profundidad de 0 a 20 cm, en la zona entre la planta madre y el hijo, donde se encuentra un mayor desarrollo radicular. Se eliminaron los primeros 2 centímetros de suelo.

Luego, se extrajo una cantidad de 1 kilogramo de esta mezcla uniforme y se introdujo en una bolsa plástica etiquetada con todos los datos necesarios para el análisis en laboratorio.

Se realizaron dos muestreos: el primero se efectuó en plantas convencionales para obtener valores de referencia en cuanto a la concentración de metales pesados. El segundo muestreo se realizó en plantas orgánicas, esto buscaba analizar el efecto del tratamiento en la concentración de metales pesados en el suelo.

3.3.2 Raíz, hojas y frutos

Se llevó a cabo la recolección de raíces y hojas en un intervalo similar al de la extracción del suelo. Para la obtención de raíces, se siguió la metodología del (INIAP, 2013), obteniendo submuestras de raíces de plantas que estaban en fase de floración, utilizando un tubo de prolongación de 1.5 metros desde el mismo agujero previamente empleado para extraer la muestra de suelo. Estas submuestras se unieron para formar una muestra compuesta.

La recolección de hojas se basó en la metodología propuesta por Agrocalidad (2020), donde se tomaron 15 submuestras de plantas orgánicas y convencionales en estado reproductivo (florecidas). Se extrajo una porción del tercio medio de la tercera hoja de cada planta seleccionada, eliminando los bordes, y se colocó en fundas de papel identificadas con los datos necesarios para el análisis de laboratorio.

Para la recolección del banano se efectuó en racimos convencionales y orgánicos, ambos muestreos siguieron la metodología de Agrocalidad (2020). De cada racimo seleccionado, se extrajo la fruta del tercio medio y se colocó en fundas de papel identificadas para su posterior análisis en laboratorio.

3.3.3 Recursos

- Palas
- Fundas herméticas plásticas
- Agua destilada 100 ml
- Marcadores
- Pipetas
- Ácido clorhídrico
- Ácido nítrico
- Tamiz
- Matraz Erlenmeyer
- Vasos de precipitados
- Filtro
- Embudos

3.4 Proceso de digestión

El proceso de digestión es una etapa relevante en la evaluación de la contaminación antropogénica por As, Cd y Fe en dos agroecosistemas bananeros, consiste en descomponer las muestras de suelo o tejido vegetal para liberar los metales presentes en formas orgánicas o inorgánicas no solubles. Para llevar a cabo este proceso, se debe elegir un método de digestión adecuado según el objetivo de estudio y las características de la muestra, los métodos más utilizados incluyen la digestión con ácido nítrico concentrado y perclórico, al igual que el uso de microondas. Se deben tomar las muestras de suelo, hojas u otros elementos a analizar, las cuales se pesan, luego se transfieren a recipientes resistentes a ácido nítrico y sometido a una temperatura 105°C para la digestión (Faz, 2023).

A continuación, se añade un reactivo ácido, como ácido nítrico u otros, que es capaz de disolver los metales presentes en la muestra., el cual se selecciona de acuerdo con los elementos a analizar y al tipo de muestra. Una vez añadido el reactivo ácido, se procede a calentarla a una temperatura controlada en un bloque digestor, esto se realiza para acelerar el procedimiento de descomposición de los elementos y lograr una disolución completa; es importante mantener las condiciones de temperatura y tiempo adecuadas, para impedir pérdidas o alteraciones en los componentes de interés. Una vez finalizado, se obtiene una solución líquida que contiene los metales analizados en forma iónica, la cual se filtra para eliminar los posibles sólidos residuales y se guarda en recipientes adecuados con su etiqueta para resguardar su trazabilidad los cuales deben ser resistentes a la corrosión y estar limpios para evitar la contaminación cruzada de muestras (López et al., 2023).

3.5 Proceso de secado

El proceso de secado es una etapa posterior a la digestión, en la cual se busca eliminar el exceso de agua de la muestra. Esto implica remover la abundancia de humedad presente para obtener un material seco y homogéneo que pueda ser utilizado en los análisis posteriores. El secado puede realizarse por medio de diferentes métodos, como la exposición a temperatura ambiente, el uso de una estufa a baja temperatura o mediante el uso de un desecador. Por medio del uso de una estufa con circulación y renovación de aire a una temperatura controlada, se procede a colocar la muestra para que se seque a su peso constante; es importante asegurarse de que la muestra esté bien distribuida en la estufa y de que no se acumule en exceso para asegurar un secado homogéneo, debido a que la presencia de humedad suele afectar los resultados de los análisis, cuyo tiempo de secado varía dependiendo del tipo de muestra, se toma como referencia un tiempo de 24 horas (TECNAL, 2023).

3.6 Proceso de obtención de muestra

Una vez que la muestra llega a su peso constante, se procede al proceso de obtención de la muestra, en esta etapa, se toman pequeñas porciones de la muestra seca y se colocan en recipientes etiquetados, las cuales deben ser representativas al total y seleccionadas para su posterior análisis. Es importante considerar que la obtención de la muestra debe realizarse de manera cuidadosa y siguiendo los protocolos establecidos, con el propósito de prevenir la contaminación de la muestra y garantizar la exactitud de los resultados obtenidos en los estudios o análisis. Una vez obtenidas las muestras, es necesario almacenar en condiciones adecuadas, en contenedores herméticos y a temperaturas controladas, para preservar su integridad e impedir posibles contaminaciones o alteraciones. Las muestras conseguidas se utilizarán en los análisis correspondientes para evaluar la contaminación antropogénica por As, Cd y Fe en los agroecosistemas bananeros (Ribeiro et al., 2021).

3.7 Protocolo de digestión de muestra

En el laboratorio se procedió a realizar el proceso de digestión de las raíces, hojas, frutas

1. Primero se 0,5g de muestra orgánica a (175°C) a un matraz Erlenmeyer. La porción se colocó en los tubos de digestión y se le agrego 9ml de ácido nítrico. Se trabajo en campana.

2. Se calentó la muestra con ácido nítrico a una temperatura moderada para iniciar la digestión. Durante esta etapa, los compuestos orgánicos se oxidarán y se descompondrán

3. Se aumento la temperatura de forma progresiva, calentando la muestra hasta que se complete la digestión.

4. Una vez que la digestión esté completa y la muestra se haya

descompuesto en su mayoría, Se procedió a enfriar a temperatura ambiente, lavando la columna refrescante con un volumen máximo de 30 mL y recuperando el líquido de enjuague en el recipiente de la digestión.

3. 7 Revisión sistemática de información bibliográfica

La investigación documental se realizó mediante una revisión exhaustiva en repositorios de tesis, libros, boletines, artículos científicos, para obtener datos que permitan contrastar, interpretar las problemáticas de investigación. En el presente trabajo no se manipulo ninguna variable en las condiciones existentes del agroecosistema bananero, para desarrollar una matriz cualitativa de Categoría, Dimensión, Instrumento y Unidad de análisis como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Contaminación de As, Cd y Pb en agroecosistema bananero, Matriz CDIU.

Carácter	Dimensión	Instrumento	Unidad de análisis
Económico	Baja productividad, equipos de trabajo	Trazabilidad y observación de rendimiento.	Área administrativa de adquisiciones
Administrativo	Gestión de aplicaciones agrícolas	Historial del cultivo y entrevistas con el entorno productivo.	Gestión de personal y plan de capacitación integral
Ambiental	Desequilibrio de nutrientes, acumulación en superficie de absorción, pH, cambio climático.	Umbral de plagas y enfermedades fitosanitarias.	Planes de manejo y prácticas agrícolas en el cultivo de musáceas
Ético	Interpretación agronómica de nutrientes y de contaminantes	Observaciones a la ética y bioética	Manejo de la unidad de producción agrícola, sostenibilidad y estilo de cultivo.
Práctica agrícola	Aplicaciones excesivas, dosificaciones intensificación agrícola, certificaciones.	Experiencias previas, muestreo y monitoreo de los metales pesados	Seguridad ocupacional de los trabajadores y riesgos laborales en el manejo de agrotóxicos.
Diagnóstico	Muestreo <i>insitu</i> y <i>ex situ</i> de agua, suelo y planta.	Bioseguridad, y evaluación del todo el agroecosistema	Análisis continuo de los factores de bioacumulación y translocación de metales pesados.
Impacto	Local, nacional e internacional	Unidad de producción agrícola y asociados locales	Políticas internas y gestión metodológica para sostenibilidad de la plantación.

3.8 Análisis de datos estadísticos

La revisión de estadísticos se realizó mediante software INFOSTA versión 2017e, para analizar las variables de respuesta, se seleccionaron los datos correspondientes del suelo, raíz, hoja, fruto de dos agroecosistemas. En este análisis, se emplearon técnicas estadísticas como el Análisis de Varianza (ANOVA) y con el test de comparación de promedios de Tukey ($p \leq 0.05$) para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las diferentes haciendas.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En esta investigación se realizó una minuciosa y completa valoración, de la contaminación antropogénica por As, Cd y Fe en dos agroecosistemas bananeros, con el propósito de identificar áreas de preocupación y proponer mejoras en las prácticas agrícolas existentes. Los análisis revelaron en las fincas convencionales y orgánicas la presencia de diversos metales pesados en las muestras de cultivo de banano. Mediante técnicas de espectrometría y análisis químico, se cuantificó la densidad de estos metales en las distintas partes de las plantas, desde el suelo hasta los frutos (ver tabla 1).

Tabla 2

Acumulación de As, Cd y Fe en agroecosistema de banano orgánico y convencional

Finca	Muestra	As (ppm)	Cd (ppm)	Fe (ppm)
Convencional	Fruto	4,22±1,16b	1,58±0,92a	5539,3±763,01a
	Hoja	0,62±0,16a	0,1±0,00b	509,22±50,53b
	Raíz	0,38±0,15a	0,76±0,25a	4563,1±1325,57a
	Suelo	2,02±1,40a	1,20±0,14a	5303,38±1798,83a
Orgánica	Fruto	0,34±0,15a	0,7±0,26a	7353,44±401,99a
	Hoja	0,54±0,18a	0±0,00 a	235,08±19,36a
	Raíz	0,34±0,10a	1,18±0,25a	6664,64±1341,36a
	Suelo	2,80±1,74a	2,56±0,82a	5682,12±727,09a

Letras distintas indica diferencia estadísticas distintas según test de Tukey ($p < 0,05$); error estándar.

En la finca convencional, el fruto registró un alto nivel de acumulación de As, con un valor de 4,22 ppm, esto indica una concentración elevada en los frutos de la finca convencional en comparación con la finca orgánica, donde el fruto tenía un nivel mucho más bajo de As 0,34 ppm. Además, en la finca convencional, las hojas y las raíces también presentaron niveles altos de As en comparación con la finca orgánica. Mediante el análisis estadístico se pudo demostrar que hay una diferencia significativa en la cantidad de ppm tanto del fruto de la finca convencional como de la finca orgánica tanto que ambos se categorizaron con distintas letras b y a respectivamente.

En estudios realizados por Antoine et al., 2017 se evaluó el contenido de arsénico en la banana cultivada en Jamaica, donde se obtuvo 0,104 mg/kg, mientras que en el presente trabajo el valor fue de 4,22 mg/kg, esta fluctuación significativa en ambas concentraciones puede deberse al lugar de cultivo, así como tipo de suelo y elección de fuente de nutrientes como abonos ya que como menciona Rodríguez et al. (2014) existe una estrecha relación entre la cantidad de metales en las plantas en base al tipo de productos utilizados.

Con respecto a la concentración de cadmio tanto el fruto, las raíces y el suelo de ambas fincas mantuvieron valores similares, a diferencia de las hojas donde la concentración fluctúa, denotando un valor de 0 ppm en la orgánica y 0,1 ppm en la convencional mismo que se categorizaron como a y b.

El nivel más alto de Cd fue 2,56 ppm en suelo convencional, en muestras de raíces y hoja variaron entre 1,18 a 0,1 ppm entre las dos fincas. En cultivos irrigados de la India contaminados con metales pesados en el suelo oscilan las concentraciones entre 0,17 – 1,31 ppm de Cd (Singh et al., 2021).

En el siguiente metal, podemos observar que la finca convencional muestra una concentración significativa de Fe en la hoja, con un valor de 509,22 ppm, en comparación con la finca orgánica, que tiene una concentración más baja de hierro en la hoja, suelo y raíz. Los resultados de (Naranjo et al., 2021) indican que varios factores desempeñan un papel en la acumulación de Fe en las plantas y que este elemento puede ser transportado a las hojas.

Tabla 3**Factores de translocación y bioacumulación de As, Cd y Fe en dos agroecosistemas**

Factores	Finca	As (ppm)	Cd (ppm)	Fe (ppm)
Translocación	Convencional	29,05±16,78a	4,37±3,26a	1,70±0,37a
	Orgánica	3,36±0,80a	1,26±0,83a	1,87±0,91a
Bioacumulación	Convencional	0,43±0,25a	0,77±0,24a	33,980±33,27a
	Orgánica	1,69±1,09a	0,54±0,15a	1,37±0,36a

La traslocación indica que la finca convencional tiene niveles significativamente más altos de As y Cd en comparación con la finca orgánica. Por otro lado, la diferencia en los niveles de Fe entre ambas fincas es mínima y es menos relevante en términos de impacto. Debido al elevado contenido de As en la finca convencional, la planta retiene este elemento en el suelo, las raíces, hojas, y lo transporta a los frutos, resultando en una concentración promedio. de 29,05 ppm. Según Salvador y Villacis (2017), la presencia de arsénico (As) en los granos de arroz cultivados en la provincia de El Oro, está vinculada a la cantidad de este metal que se encuentra en el suelo. Los resultados muestran diferencias significativas en la bioacumulación de As, Cd y Fe entre las fincas convencionales y orgánicas. Estas diferencias pueden deberse a las prácticas agrícolas, el uso de productos químicos y la gestión del suelo en cada tipo de finca.

4.1 Discusión

1. Acumulación de As en planta de banano

Los resultados de la investigación sobre la acumulación de arsénico (As) en cultivos de banano revelan notables diferencias entre fincas convencionales y orgánicas, con concentraciones significativamente más altas de As en la finca convencional, especialmente en las frutas con valor promedio de 4,2 ppm en contraste con 0,4 ppm en la finca orgánica, hojas y raíces. Estas diferencias, respaldadas por análisis estadísticos, sugieren influencias ambientales como la ubicación de cultivo y la composición del suelo. En contraste, una revisión sobre fitorremediación de metales pesados en el suelo resalta la problemática global de la contaminación, con publicaciones de varios países, y describe especies vegetales efectivas para acumular y extraer metales pesados, aunque su eficacia varía según el metal y la especie. Estos hallazgos enfatizan la importancia de abordar las inseguridades de los metales pesados en la agricultura y el medio ambiente, destacando la necesidad de prácticas sustentables y tecnologías verdes (Bobadilla et al., 2022).

2. Concentración de Cd en planta de banano

Los resultados de la investigación sobre la concentración de cadmio (Cd) en cultivos de banano reflejan similitudes notables en los niveles de Cd en los frutos, raíces y suelo de fincas convencionales y orgánicas, con la única diferencia significativa encontrada en las hojas. La finca convencional exhibe un nivel de Cd de 0.1 ppm en las hojas, en contraste con la finca orgánica donde este valor es de 0 ppm; no obstante, no se observan diferencias destacadas en la acumulación de Cd en otras partes de la planta. Por otro lado, un estudio relacionado con el cacao ecuatoriano señala una preocupación debido a la elevada concentración de Cd en los granos de cacao, superando los límites permitidos para exportación. Este estudio revela variaciones

significativas en los niveles de Cd en hojas, testa y almendra, sugiriendo la influencia crucial de las condiciones del suelo y la fertilización en dicha acumulación (Barrezueta et al., 2021).

3. Concentración de Fe en planta de banano

Los resultados de la investigación sobre la concentración de Fe en cultivos de banano y el análisis de la calidad del agua para riego en el departamento de Boyacá presenta perspectivas contrastantes en cuanto a la presencia de hierro en el entorno agrícola. En la investigación sobre banano, se destaca que la finca convencional exhibe una concentración significativamente alta de Fe en las hojas, registrando 509.22 ppm, mientras que la finca orgánica muestra concentraciones más bajas en hojas, suelo y raíces. Esta diferencia resalta la influencia de las prácticas agrícolas en la acumulación de Fe en las plantas. Por otro lado, el estudio de calidad del agua para riego en Boyacá revela que, aunque algunas fuentes de agua presentan altas concentraciones de Fe, estas son aptas para el riego agrícola en la mayoría de las fincas evaluadas. Sin embargo, se mencionan restricciones en algunas fincas, debido a la presencia de Fe, junto con otros elementos como Mg y B. Estos resultados subrayan la importancia de la calidad del agua en la nutrición de las plantas y sugieren que, aunque el Fe sea un factor de preocupación en algunas fincas, en general, el agua es adecuada para el riego agrícola en la región (Guerrero et al., 2021).

4. Factores de translocación y bioacumulación:

Los resultados de la investigación sobre los factores de translocación y bioacumulación en cultivos de banano muestran que la finca convencional acumula significativamente más As y Cd que la finca orgánica, reflejando la influencia de las prácticas agrícolas en la acumulación de estos metales pesados, aunque las diferencias en los niveles de Fe son mínimas. Por otro lado, el análisis de pasivos ambientales mineros se enfoca en la acumulación de metales pesados en la

vegetación cercana a antiguas instalaciones mineras abandonadas, resaltando la relevancia de evaluar la contaminación por metales pesados en estas circunstancias específicas., donde la movilización de carga metálica en drenajes ácidos representa un riesgo ambiental. Ambos estudios resaltan la necesidad de comprender y abordar la acumulación de metales pesados en diferentes contextos agrícolas y ambientales, subrayando la influencia de las prácticas y la importancia de evaluar los riesgos asociados con la presencia de estos elementos tóxicos (Cahuana & Aduvire, 2019).

En resumen, este estudio ofrece pruebas contundentes de la contaminación por metales pesados en sistemas de cultivo de banano y pone de relieve cómo las prácticas agrícolas influyen en la acumulación de As, Cd y Fe en los cultivos.

4.1 Propuesta de mitigación de metales pesados en plantaciones bananeras

Los resultados subrayan la necesidad de implementar mejoras en las prácticas agrícolas, especialmente en las fincas convencionales, con el objetivo de reducir los niveles de contaminación y garantizar la seguridad de los alimentos. Además, se destaca la importancia de futuras investigaciones para comprender de manera más completa los factores que afectan la acumulación de metales pesados en los cultivos de banano, su posible impacto en la salud pública y el medio ambiente. Es por ello que el personal agrícola y el agricultor debe revisar soluciones integrales plantaciones orgánicas y convencionales evidenciado enfoque y criterios tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Observaciones y soluciones propuestas para los metales pesados en agroecosistemas bananeros

Carácter	Dimensión	Propuesta para el estilo de cultivo orgánico	Propuesta para el estilo de cultivo convencional
Económico	Baja productividad, equipos de trabajo	Costos de producción	Costos de producción
Administrativo	Gestión de aplicaciones agrícolas	Compra de bioinsumos, comercio justo.	Compra de insumos agrícolas, comercio por oferta y demanda.
Ambiental	Desequilibrio de nutrientes, acumulación en superficie de absorción, pH, cambio climático.	Eco amigables, minerales, productos orgánicos.	Riegos humanos y ambientales, uso de minerales, moléculas químicas o sintéticas.
Ético	Interpretación agronómica de nutrientes y de contaminantes	Aplicaciones, uso de conocimiento ancestral y artesanal, poca efectividad, falta de evaluación de umbral y puntos de equilibrio.	Ficha técnica, necesidad de capacitación, falta de control en las aplicaciones.
Práctica agrícola	Aplicaciones excesivas, dosificaciones intensificación agrícola, certificaciones.	Estricto uso de productos orgánicos, certificaciones.	Políticas públicas en la intensificación agrícola.
Diagnóstico	Muestreo <i>insitu</i> y <i>ex situ</i> de agua, suelo y planta.	Mezcla de enmiendas, minerales y bioinsumos, peritos de certificaciones orgánicas.	Mezcla de productos orgánicos y químicos, peritos de certificaciones de exportación.
Impacto	Local, nacional y internacional	Asociaciones de pequeños agricultores.	Gremios, bananeros, asociaciones de grupos exportadores.

El estudio encontró cambios en el ambiente que afectan a los nutrientes, absorción, pH y clima; respaldando lo afirmado por Barchuk (2020), sobre los desequilibrios en el metabolismo de las plantas, debido a actividades excesivas, falta de cobertura y uso de químicos. En cuanto al criterio ético, se estableció la interpretación agronómica de nutrientes y de contaminantes, lo cual se justifica con lo manifestado por Cardona et al. (2019), quién afirmó que el análisis del suelo es vital para que los ingenieros agrónomos comprendan las relaciones entre los nutrientes y las necesidades de los cultivos. Aguilar (2021) expresó afirma que también se utiliza para detectar problemas físicos en el suelo como encharcamiento o ausencia de porosidad.

Además, se encontró que en la práctica agrícola hay aplicaciones excesivas y dosificaciones intensificadas. Dicha aseveración se contrasto con lo manifestado en Naranjo et al. (2021), en el que destaca que las plantaciones bananera deben tener una combinación de fertilizantes adecuada a las condiciones edafoclimáticas, pero esto no siempre se cumple, debido a la falta de conocimiento técnico-científico. Asimismo, se confirmó el uso de malas prácticas en el estudio efectuado por Romero (2021), donde que se verificó la aplicación recurrente de agentes fungicidas con el fin de abordar la patología conocida como Sigatoka Negra (*Mycosphaerella fijiensis*), empleando productos de frecuencia elevada y cantidades de 1.2-5.0 l/3ha usados en intervalos de 15 días. Por lo tanto, se concluye que estos hallazgos resaltan la importancia de realizar análisis de suelo, tomar decisiones agronómicas éticas para lograr un manejo sostenible y eficiente de los cultivos. La revisión de información bibliográfica constituyo un espacio para contrastar las problemáticas y identificar varias fuentes de contaminación de los metales pesados. Esta contaminación se origina por las malas prácticas agrícolas impediendo el estilo de cultivo en las observaciones de la tabla CDIU. Las soluciones se proponen mediante el análisis cualitativo para la aplicación adecuada de productos químicos, minerales y biológicos,

por lo que se establece 14 pasos a nivel de protocolo para mejorar las buenas prácticas agrícolas en el sector bananero del Ecuador. Los agroecosistemas bananeros requieren conocer de premisa que aporten al seguimiento y monitoreo de la plantación mediante un protocolo de mitigación como el que proponemos a continuación:

Protocolo de mitigación del cultivo bananero

1. Evaluación detallada del agroecosistema.
2. Implementar prácticas agrícolas seguras.
3. Monitoreo regular del suelo y el agua.
4. Restricciones de uso de suelo contaminado.
5. Promoción de variedades de banano con menor acumulación.
6. Manejo integrado de plagas y fertilizantes.
7. Creación de barreras vegetales.
8. Rotación de cultivos.
9. Uso de enmiendas adecuadas.
10. Prácticas adecuadas de riego.
11. Restricción de áreas contaminadas.
12. Control de erosión.
13. Tecnologías limpias y prácticas sostenibles
14. Comunicación de resultados

Un protocolo de mitigación es importante para promover la sostenibilidad ambiental en el cultivo, al reducir el impacto negativo de los metales pesados en la producción de banano. También se busca proteger la biodiversidad y la salud del personal operativo al establecer estándares de seguridad y regulaciones en la agricultura de Ecuador para la producción de banano.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Los resultados revelaron la presencia de estos metales en fincas convencionales y orgánicas, con concentraciones altas de As y Cd en frutos, hojas y raíces de la finca convencional en comparación con la orgánica, respaldadas por análisis estadísticos que categorizaron ambas con letras distintas. Estas disparidades señalan que la influencia de las prácticas agrícolas, las características del suelo y el uso de nutrientes en la absorción, son vitales para el monitoreo los metales pesados en el cultivo. Además, el Fe mostró concentraciones elevadas en las hojas de la finca convencional, lo que quiere decir que puede causar un desequilibrio en la solución nutritivas del suelo bananero.
- Estos hallazgos destacan la necesidad de mejorar las prácticas agrícolas en la producción de banano con el fin de reducir la contaminación por As, Cd y Fe. Además, resaltan la importancia de implementar estrategias de gestión sostenible que protejan la seguridad alimentaria, la salud pública, utilizando protocolo de mitigación que aporte con la prodccion sostenible y consumo responsable instaurado en los obejtivos desarrollo sostenible de la ONU .

5.2 Recomendaciones

- Se sugiere implementar medidas de control y monitoreo regulares en las fincas bananeras, especialmente en las convencionales, para reducir la acumulación de arsénico y cadmio en los cultivos. Esto podría incluir la revisión de las prácticas de fertilización y el uso de abonos, así como la consideración de alternativas de cultivo que minimicen la absorción de estos metales pesados; además, se recomienda llevar a cabo análisis del suelo y del agua de riego para evaluar su influencia en la presencia de metales pesados en los cultivos.
- Se aconseja realizar investigaciones adicionales para comprender mejor cómo las prácticas agrícolas y los factores ambientales influyen en la reserva de metales pesados en los cultivos de banano. Esto permitirá desarrollar estrategias específicas de manejo del suelo y de fertilización que reduzcan la presencia de arsénico, cadmio y hierro en los cultivos, promoviendo así la producción de banano más segura y saludable. También es aconsejable fomentar la adopción de prácticas agrícolas sostenibles y establecer normas de control de calidad en la producción de banano como medidas para salvaguardar tanto la salud pública como el entorno.

Bibliografía

AGROCALIDAD. (2020). *Buenas Prácticas Agrícolas BPA*.

<https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/material1.pdf>

AGROCALIDAD. (2020). *Manual de aplicabilidad de buenas prácticas agrícolas para*

banano . <https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/manu3.pdf>

AGROCALIDAD. (2020). *Muestreo para análisis de suelo*.

<https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/agua8.pdf>

AGROCALIDAD. (2020). *Toma de muestras para el laboratorio de Fitopatología*.

<https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/05/dxi3.pdf>

Antoine, J., Hoo, L., & Grant, C. (2017). Evaluación de los posibles riesgos para la salud

asociados con el contenido de aluminio, arsénico, cadmio y plomo en frutas y verduras seleccionadas cultivadas en Jamaica. *Informes de Toxicología*, 4, 181-187.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.03.006>

Avogadro, E., & Padró, J. (2019). Diferenciación de plantaciones forestales en EntreRíos

(Argentina): Comparación de métodos de clasificación aplicados a imágenes sentinel-2 y landsat-8. *Revista internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica*(24), 117–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.21138/GF.652>

<https://doi.org/https://doi.org/10.21138/GF.652>

Balali, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Reza, M., & Sadeghi, M. (2021). Mecanismos tóxicos

de cinco metales pesados: mercurio, plomo, cromo, cadmio y arsénico. *Frente*.

Pharmacol, 12. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>

Barrezueta, S., Armijos, I., & Vega, E. (2021). Comparación de los niveles de cadmio en hojas,

testa y almendra en cultivares de *Theobroma cacao* L. *Revista Ciencia UNEMI*, 14(37),

73-80. <https://doi.org/https://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/view/1289>

Bobadilla, W., Valderrama, J., Luján, J., LLaque, G., & Valderrama, M. (2022).

Fitorremediación de metales pesados en el suelo. Una revisión sistemática de la literatura entre los años 2012-2022. *International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development*, 5-7.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2022.1.1.21>

Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos. *REVISTA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS*, 33(2), 117-124. <https://doi.org/>

<http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Cahuana, L., & Aduvire, O. (2019). Bioacumulación de metales pesados en tejidos de vegetación acuática y terrestre evaluados en áreas donde existen pasivos ambientales mineros en el Perú. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 19-36.

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200002&lng=es&tlng=es.

Camargo, Y., Tovar, F., & Álvarez, E. (2021). RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN CULTIVOS DEL MUNICIPIO ZONA BANANERA, DEPARTAMENTO DEL MAGDALENA, COLOMBIA. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 37.

<https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.53725>

Danyu, Y., Lan Wu, H., & Qing, H. (2021). Hierro en interacciones planta-patógeno. *Journal of Experimental Botany*, 72(6), 2114–2124.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jxb/eraa516>

Faz, Á. (2023). *La Digestión como método químico de extracción de metales pesados*.

<https://www.upct.es/~minaees/digestion.pdf>

Fowler, B., Choe, S., Jones, R., Costa, M., & Chen, C. (2022). Manual sobre toxicología de los

- metales (quinta edición). *Academic Press*, 2, 41-89.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822946-0.00037-4>
- Garita, R. (2022). *Banano*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Guerrero, J., Castellanos, L., & Rodríguez, N. (2021). Calidad de agua para riego de 60 fincas agroecológicas de 4 municipios del departamento de Boyacá. *INGECUC*, 17(1), 96–111. <https://doi.org/http://doi.org/10.17981/>
- INEC. (2021). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, 2020*.
https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Boletin%20Tecnico%20ESPAC%202020.pdf
- Infante, M. (2020). *Elegir la ubicación adecuada para su huerto*. Escuela de Ciencias Ambientales y Biológicas de la Estación Experimental Agrícola de Nueva Jersey:
<https://sebsnjaesnews.rutgers.edu/2020/04/choosing-the-right-location-for-your-vegetable-garden/>
- INIAP. (2013). *Guía para reconocer daño en raíces y métodos de muestreo y extracción de nemátodos en raíces y suelo*. <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/3849>
- León, L., Arcaya, M., Barbotó, N., & Bermeo, Y. (2020). Ecuador: Análisis comparativo de las exportaciones de banano orgánico y convencional e incidencia en la Balanza Comercial, 2018. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 7(2), 38-46.
<https://doi.org/10.26423/rctu.v7i2.521>
- Li, Z., Kuang, H., & Li, L. (2023). ¿Qué efectos adversos para la salud nos traerá la coexposición ambiental a metales pesados?: basado en un estudio de monitoreo biológico de trabajadores de saneamiento. *Environ Sci Pollut*(30).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-022-24805-9>

- López, J., Alvira, L., Talavera, O., Sarmiento, A., & Hernández, G. (2023). Fraccionamiento químico de metales pesados y metaloides potencialmente tóxicos en lodos generados por la planta de tratamiento de agua residual Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Bol. Soc. Geol.*, 72(2), 1-22.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18268/bsgm2022v74n2a121221>
- Medina, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(1), 93-102.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604>
- Naciones Unidas. (2023). *Los suelos, origen de los alimentos*.
<https://www.un.org/es/observances/world-soil-day>
- Naranjo, C., & WingChing, R. (2023). Arsénico, cadmio, mercurio y plomo en alimentos importados para mascotas en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 1-13.
[https://doi.org/ https://doi.org/10.15517/am.v34i1.48399](https://doi.org/https://doi.org/10.15517/am.v34i1.48399)
- Naranjo, J., Vera, M., & Mora, A. (2021). Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): Una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. *Siembra*, 8(2).
<https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>
- Ning, S., & Zeller, M. (2019). Manejo de la deficiencia de hierro. *Programa Hematology Am Soc Hematol Educ*, 1, 315-322.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1182/hematologia.2019000034>
- Ribeiro, I., Nascimento, P., González, M., & Oliveira, A. (2021). Métodos GFAAS simples y robustos para la determinación de As, Cd y Pb en productos de cáñamo utilizando diferentes estrategias de preparación de muestras. *Rev. Bras Cienc.*, 14, 1043–1053.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000300040>

Rodríguez, J., Alcalá, J., Hernández, A., Rodríguez, H., Ruiz, F., García, J., & Díaz, P. (2014).

Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 695-701.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000400013

Sahodaran, N., & Ray, J. (2018). Contaminación por metales pesados en campos bananeros

"químicos" de la revolución verde en el sur de la India. *Ciencia Ambiental e*

Investigación de la Contaminación(25). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-2729-0>

Salvador, J., & Villacis, K. (2017). Determinación de la concentración de arsénico total en

cultivos de arroz en la provincia de El Oro y su relación con propiedades físicas y químicas del suelo, agua y planta. Repositorio: Universidad Fuerzas Armadas.

<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12612>

Schmidt, W., Thomine, S., & Buckhout, T. (2020). Hierro Nutrición e Interacciones en las

Plantas. *Frente. Plant Sci.*, 10. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01670>

Singh, G., Patel, N., Jindal, T., & Rawat, M. (2021). Contaminación por metales pesados en

suelos y cultivos regados por el río Kali en Uttar Pradesh, India. *Toro Environ Contam Toxicol*, 107(5), 931-937. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03349-7>.

Soriano, R. (2019). La producción de bananos asociados con leguminosas y plantas forrajeras

en la República Dominicana. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 2(2), 59-65.

<https://doi.org/10.22206/cac.2019.v2i2.pp59-65>

TECNAL. (2023). *Proceso de secado*. <https://tecnal.com.br/es>

Tonolli, A., Greco, S., & Sarandón, S. (2019). Algunos aspectos emergentes y de importancia

para la construcción del enfoque agroecológico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 51(1), 205-212.

<https://doi.org/https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/RFCA/article/view/2432>

Toribio, F., & Villalón, M. (2022). Impacto del gradiente altitudinal en la producción de una plantación forestal comercial de candelilla. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 18(1), 22-38. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/322>

Zurita, A. (2020). *Estudio nutricional sobre la composición y consumo de alimentos para perdida-control de peso: papel del farmaceutico comunitario.*

<https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/63383/81077.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Naranjo-Morán, J., Vera-Morales, M., & Mora-González, A. (2021). Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): Una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. *Siembra*, 8(2), e2680. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>

Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>

Antoine, J. M., Fung, L. A. H., & Grant, C. N. (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.

Simon, M. K., y Goes, J. (2013). Ex post facto research. Retrieved September, 25, 2013.

- Singh, G., Patel, N., Jindal, T., y Ranjan, M. R. (2021). Heavy Metal Contamination in Soils and Crops Irrigated by Kali River in Uttar Pradesh, India. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 107(5), 931–937. doi:10.1007/s00128-021-03349-7
- Rodríguez Ortiz, J. C., Alcalá Jáuregui, J. A., Hernández Montoya, A., Rodríguez Fuentes, H., Ruiz Espinoza, F. H., García Hernández, J. L., & Díaz Flores, P. E. (2014). Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 695-701.
- Naranjo-Morán, J., Vera-Morales, M., & Mora-González, A. (2021b). Acumulaciones de hierro en agroecosistemas bananeros (Milagro, Ecuador): Una revisión bibliográfica de algunos factores que intervienen en la salud y nutrición del cultivo. *Siembra*, 8(2), e2680. <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.2680>

Anexos

Tabla 5

Concentración de metales en la fruta del banano en la plantación orgánica

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	-0.005	0.000	2.360

Tabla 6

Concentración de metales en la fruta del banano en la plantación convencional

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	-0.009	0.000	2.417

Tabla 7

Concentración de metales en la raíz de banano de la plantación Orgánica

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	-0.001	0.015	84.310
2	-0.004	0.002	13.273
3	-0.007	0.013	75.920
4	0.003	0.014	78.784
5	-0.002	0.015	80.945
6	0.002	0.014	77.799
7	0.010	0.016	87.787
8	0.014	0.026	97.094
9	0.008	0.017	93.530
10	0.000	0.014	79.757

Elaborado por: Carpio, 2023.

Tabla 8*Concentración de metales en la raíz de banano en la plantación Convencional*

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	0.002	0.012	69.494
2	0.007	0.015	84.810
3	-0.008	0.003	21.177
4	0.000	0.003	20.536
5	-0.001	0.005	32.138
6	-0.004	0.014	79.701
7	0.000	0.014	79.537
8	-0.004	0.010	63.160
9	-0.007	0.002	14.988
10	-0.022	0.011	70.989

Tabla 9*Concentración de metales en la hoja de banano en la plantación Convencional*

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	-0.006	0.001	4.699
2	0.002	0.001	3.575
3	-0.005	0.001	6.649
4	-0.012	0.001	4.982
5	0.006	0.001	5.556
6	-0.016	0.001	3.936
7	0.004	0.001	5.082
8	-0.003	0.001	4.107
9	-0.011	0.001	4.219
10	0.012	0.017	91.285

Tabla 10*Concentración de metales en la hoja de banano en la plantación Orgánica*

Muestra	Concentración (ppm)		
	Arsénico	Cadmio	Hierro
1	0.001	0.000	2.724
2	0.002	0.000	1.624
3	-0.010	0.000	2.629
4	-0.005	0.000	2.360
5	-0.009	0.000	2.417
6	-0.011	0.000	3.037
7	0.001	0.011	64.866
8	-0.006	0.000	2.574
9	-0.010	0.000	2.562
10	-0.007	0.001	4.348

Figura 2

Recolección de muestra



Figura 3

Proceso de digestión de muestra



Figura 5 CURVA DE CALIBRACION

Calibration Summary

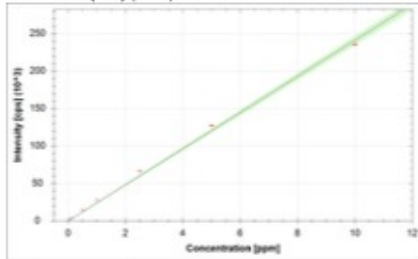
8/24/2023 7:09:27 PM



Labbook 6METALES-TESIS-FINAL-24AGOSTO.imexp

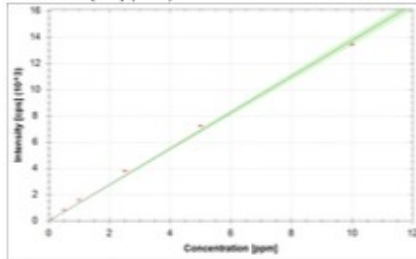
Calibration Graphs

Cd 226.502 (449) (Axial)



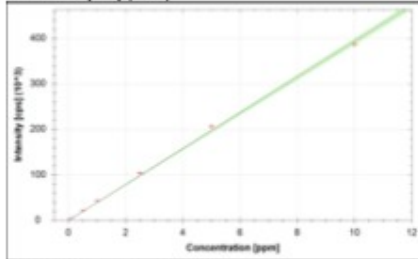
$f(x) = 24099.1078 \cdot x + 16.8178$
 $R^2 = 0.9970$
BEC = 0.001 ppm
LoD = 0.0003 ppm

Pb 220.353 (453) (Axial)



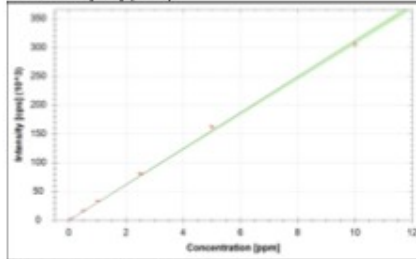
$f(x) = 1376.3793 \cdot x + -3.6657$
 $R^2 = 0.9970$
BEC = -0.003 ppm
LoD = 0.0020 ppm

Cr 283.563 (119) (Axial)



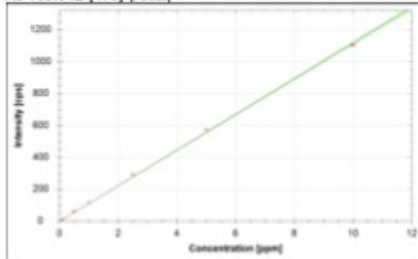
$f(x) = 39362.8130 \cdot x + 51.2694$
 $R^2 = 0.9983$
BEC = 0.001 ppm
LoD = 0.0001 ppm

Fe 259.940 (130) (Axial)



$f(x) = 31013.4607 \cdot x + 20.0903$
 $R^2 = 0.9967$
BEC = 0.001 ppm
LoD = 0.0003 ppm

As 189.042 (478) (Axial)



$f(x) = 111.7148 \cdot x + -0.6088$
 $R^2 = 0.9992$
BEC = -0.005 ppm
LoD = 0.0053 ppm