

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
**Facultad de Ciencias y Humanidades**



CUANTIFICACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y ARSÉNICO EN  
AGUA, SUELO Y VEGETACIÓN DE LA MICROCUENCA  
DEL RÍO CONTRERAS POR MEDIO DE  
VOLTAMPEROMETRÍA DE TIRAS

**Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Ana  
Lourdes López Noguera para optar al grado académico de Licenciada  
en Química**

Guatemala,  
2025



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
**Facultad de Ciencias y Humanidades**



CUANTIFICACIÓN DE PLOMO, CADMIO Y ARSÉNICO EN  
AGUA, SUELO Y VEGETACIÓN DE LA MICROCUENCA  
DEL RÍO CONTRERAS POR MEDIO DE  
VOLTAMPEROMETRÍA DE TIRAS


**Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Ana  
Lourdes López Noguera para optar al grado académico de Licenciada  
en Química**

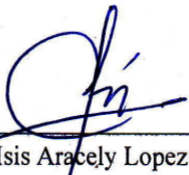
Guatemala,  
2025

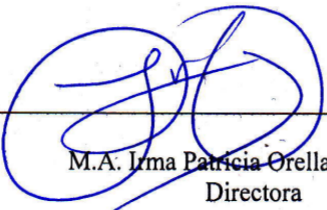
Vo. Bo. :

(f)   
M.A. Irma Patricia Orellana Catalán  
Asesor

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Ingrid Yurrita Pocasangre

(f)   
Lic. Isis Aracely Lopez Cifuentes

(f)   
M.A. Irma Patricia Orellana Catalán  
Directora  
Departamento de Química

Fecha de aprobación: Guatemala, 03 de diciembre de 2025

## PREFACIO

Como primer punto, agradezco a Dios por darme la oportunidad de ser una mujer con educación superior, por acompañarme en todo momento y por escuchar mis oraciones.

Agradezco a mi familia, por siempre estar conmigo y apoyarme incondicionalmente. Gracias por sus palabras de aliento, por creer en mí y por su amor. Gracias por estar siempre al pendiente mío, de mi trabajo, de mi salud y por siempre llevarme y traerme a donde necesitara. Gracias a mi papá Eduardo López y mi mamá Ana María Noguera por financiar mi educación, a pesar de las dificultades. Gracias a mi hermano Diego José por hacerme ganas cuando lo necesitaba y su acompañamiento en este camino. Y gracias a mi familia indirecta, especialmente a mis primas Andrea y Mariel Tello, quienes siempre han visto por mi bienestar.

Agradezco a todos los catedráticos que me brindaron del conocimiento necesario para llegar a este punto, quienes siempre estaban dispuestos a responder mensajes y dudas y por su paciencia y pasión por formar a los estudiantes.

Agradezco a mis amigos de la Universidad. Gracias a María Renné Kefalas por sus años de amistad sincera, por ser mi compinche. Gracias a Johanna Morales por estar siempre presente, hablando de nuestros gustos compartidos y su cariño. Gracias a Javier Meza, quien no dudaba en brindar apoyo a quien fuera y por sus chistes de papá. Gracias a Pablo Montenegro, por siempre brindar de risas. Gracias a todos y cada uno por los buenos y malos momentos que pasamos juntos. Gracias ahora como colegas y amigos.

Finalmente, agradezco a mi asesora y directora de carrera, Irma Orellana, por darme la oportunidad de trabajar en este tema de investigación

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN .....	1
II.	ANTECEDENTES .....	3
III.	JUSTIFICACIÓN .....	5
IV.	OBJETIVOS .....	7
	A. OBJETIVO GENERAL .....	7
	B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
V.	HIPÓTESIS.....	8
VI.	MARCO TEÓRICO.....	9
	A. METALES PESADOS .....	9
	1. Plomo.....	10
	2. Cadmio.....	10
	3. Arsénico.....	11
	B. CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA.....	12
	C. CONTAMINACIÓN EN SUELOS.....	13
	D. CONTAMINACIÓN EN VEGETACIÓN.....	14
	E. RÍO CONTRERAS.....	14
	F. NORMATIVAS Y LÍMITES .....	16
	G. MÉTODOS DE DETECCIÓN .....	18
	1. Voltamperometría de tiras .....	18
VII.	METODOLOGÍA .....	21
	A. SUJETO DE ESTUDIO .....	21
	B. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	21
	C. TIPO Y TAMAÑO DE MUESTRA .....	21

D.	DISEÑO DE MUESTREO.....	22
1.	Muestras de agua .....	22
2.	Muestras de suelo .....	22
3.	Muestras de vegetación .....	22
4.	Codificación de muestras.....	23
E.	BIOSEGURIDAD Y DESECHOS.....	23
F.	VARIABLES .....	24
1.	Independientes .....	24
2.	Dependientes .....	24
G.	MATERIALES .....	25
1.	Equipo.....	25
2.	Reactivos .....	25
3.	Cristalería.....	26
H.	PROCEDIMIENTO.....	26
1.	Preparación de soluciones .....	26
2.	Preparación de muestras .....	27
I.	EQUIPO.....	29
1.	Descripción y cuidados del equipo .....	29
2.	Análisis de muestras .....	30
VIII.	RESULTADOS.....	35
IX.	DISCUSIÓN .....	48
X.	CONCLUSIONES .....	52
XI.	RECOMENDACIONES.....	54
XII.	REFERENCIAS.....	55
XIII.	ANEXOS .....	61

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Límites de metales pesados en agua OMS .....	16
Cuadro 2. Límites máximos permitidos en algunos productos vegetales .....	16
Cuadro 3. Límites de metales pesados en suelos EPA.....	17
Cuadro 4. Límite máximo permitido de metales pesados en agua COAGUANOR 29001 .....	17
Cuadro 5. Programa de digestión ácida para muestras de suelo en equipo ETHOS UP. .	28
Cuadro 6. Programa de digestión ácida para muestras de vegetación en equipo ETHOS UP. .....	28
Cuadro 7. Prámetros para limpieza del electodo .....	31
Cuadro 8. Prámetros para limpieza del electrodo .....	32
Cuadro 9. Parámetros de lectura de muestras .....	33
Cuadro 10. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de agua .....	35
Cuadro 11. Variación entre duplicados en matriz de agua .....	36
Cuadro 12. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de suelo .....	36
Cuadro 13. Variación entre duplicados en matriz de suelo .....	37
Cuadro 14. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de vegetación .....	37
Cuadro 15. Variación entre duplicados en matriz de vegetación.....	38
Cuadro 16. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz agua.....	38
Cuadro 17. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz suelo.....	39
Cuadro 18. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz vegetación .....	39
Cuadro 19. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz agua .....	44
Cuadro 20. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz suelo .....	45
Cuadro 21. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz vegetación .	45

Cuadro 22. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de agua contra normas COAGUANOR y OMS.....	46
Cuadro 23. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de suelo contra norma EPA.....	46
Cuadro 24. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de vegetación contra norma CXS 193-1995 .....	47
Cuadro 25. Comparación de muestras de suelo contaminadas de Pb contra norma EPA .....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del río Contreras .....	15
Figura 2. Parámetros de adición de estándares .....	34
Figura 3. Curva de calibración Pb en matriz agua .....	40
Figura 4. Curva de calibración Cd en matriz agua.....	40
Figura 5. Curva de calibración As en matriz agua.....	41
Figura 6. Curva de calibración Pb en matriz suelo .....	41
Figura 7. Curva de calibración Cd en matriz suelo.....	42
Figura 8. Curva de calibración As en matriz suelo.....	42
Figura 9. Curva de calibración Pb en matriz vegetación .....	43
Figura 10. Curva de calibración Cd en matriz vegetación.....	43
Figura 11. Curva de calibración As en matriz vegetación .....	44
Figura 12. Voltammograma MA1P1 lectura 1 .....	61
Figura 13. Resultados MA1P1 lectura 1 obtenidos en el Software PSTrace.....	62
Figura 14. Voltammograma MT3P1 lectura 1 .....	62
Figura 15. Resultados MT3P1 lectura 1 obtenidos en el software PSTrace.....	63
Figura 16. Voltammograma MV2P1 lectura 2 .....	63
Figura 17. Resultados MV2P1 lectura 2 obtenidos en el software PSTrace .....	64
Figura 18. Equipo de voltamperometría SensitSmart.....	64
Figura 19. Electrodo Italsens IS-HM.....	65
Figura 20. Horno Froilabo Air Expert. ....	65
Figura 21. Equipo de digestión ETHOS UP .....	66
Figura 22. Muestra de vegetación pulverizada, previa a digestión.....	66
Figura 23: Muestras de vegetación antes de digestión.....	67
Figura 24. Muestras de vegetación digeridas.....	67
Figura 25. Punto de muestreo en microcuenca .....	68

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar la presencia de metales pesados, específicamente de los analitos plomo, cadmio y arsénico en agua, suelo y vegetación de la microcuenca del río Contreras, mediante el uso de la voltamperometría de tiras. No se encontraron concentraciones de cadmio cuantificables en ninguna matriz analizada. Respecto al analito arsénico, los resultados obtenidos no son confiables ni precisos, debido a que este presentó un comportamiento no lineal tanto en las curvas de calibración como en la metodología aplicada de adición de estándares. Únicamente se encontraron cantidades cuantificables de plomo en 6 de las muestras de la matriz de suelo. Sin embargo, no sobrepasaron los límites máximos permitidos de plomo en suelo, establecidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) . Además, se realizó una comparación de las medias de plomo, cadmio y arsénico de cada matriz analizada contra los máximos establecidos por diferentes normas que establecen límites de contaminantes en diferentes matrices. Dentro de estos, se encontró que las medias de los analitos estudiados en la matriz de vegetación incumplen con la normativa CXS 193-1995, recalcando que esta se enfoca en vegetales para consumo humano. Con forme a los resultados estadísticos obtenidos, se observa que existe una gran dispersión y varianza entre las muestras, así como se pudo notar variabilidad entre las mediciones realizadas en duplicado. Se concluye que el equipo es capaz de identificar cada metal, pues estos presentan sus picos característicos, sin embargo, existen limitaciones para la cuantificación de arsénico. Se recomienda realizar un análisis paralelo con otro equipo, con el objetivo de verificar la correcta lectura de las muestras, así como se recomienda un transporte adecuado de los electrodos para evitar que estos sean dañados en el trayecto.

## I. INTRODUCCIÓN

Guatemala se caracteriza por ser un país con una amplia riqueza de recursos naturales, presentando una gran variedad de cuerpos de agua en las distintas regiones del país. Estos recursos hídricos son de suma importancia para comunidades que se benefician del agua, ya sea por su uso en la agricultura, turismo o consumo humano. Guatemala cuenta con 38 cuencas hidrográficas, 23 lagos y lagunas y 119 lagunas menores (FUNCAGUA, 2022).

No obstante, los cuerpos hídricos de Guatemala presentan niveles significativos de contaminación, lo que afecta drásticamente la calidad del agua. Las principales fuentes de contaminación incluyen descargas de aguas residuales provenientes de municipios aledaños, actividades agropecuarias, industria y agroindustria (MARN, 2023). A esto se le suma la falta de un correcto tratamiento de aguas residuales y una planificación urbana ineficiente. Esto provoca una crisis en el sector de la salud, ya que el consumo de esta agua contaminada está relacionada a problemas y enfermedades como la diarrea, cólera, fiebre tifoidea, entre otros (FUNCAGUA, 2024). Además de efectos adversos provocados por un consumo de agua contaminada por sustancias químicas, como los metales pesados.

Los metales pesados son aquellos elementos químicos de alta densidad y de peso atómico elevado. Estos representan un atentado a la salud pública y ambiental debido a su toxicidad y su capacidad de bioacumulación, donde las principales consecuencias por su exposición incluyen la falta de crecimiento de vegetación, erupciones cutáneas, debilitamiento del sistema inmune, problemas en el sistema respiratorio y digestivo, daño en órganos y cáncer (S. E. Pabón, 2020).

Por ello, es de vital importancia implementar y mantener un control que permita evaluar la presencia de metales pesados para determinar la calidad del agua, identificando las posibles fuentes de contaminación y aportando al diseño de métodos para su extracción y retención.

En el presente trabajo se busca analizar la presencia de metales pesados como cadmio (Cd), arsénico (As) y plomo (Pb) en la microcuenca del río Contreras, ubicado en la zona 15 capitalina. Debido a que es de conocimiento el daño que causa el consumo directo e indirecto de dichos metales pesados, el estudio fue enfocado en tres matrices: suelo, agua y vegetación con el objetivo de evaluar la presencia de los contaminantes mencionados. Para la detección de los metales pesados estudiados se empleó la técnica electroquímica de voltamperometría de tiras, con un electrodo ItalSens IS-HM. Esta metodología electroquímica permite la identificación y cuantificación de metales a nivel traza en solución. La voltamperometría se caracteriza por su capacidad de análisis multielemental y su portabilidad, haciéndola una herramienta útil para análisis ambientales.

## II. ANTECEDENTES

Actualmente existe el Proyecto “Microcuenca Pedagógica del Río Contreras” respaldado por la Universidad del Valle de Guatemala con apoyo de la Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala (FUNCAGUA) y que tiene como principal objetivo *«desarrollar y fortalecer capacidades para la gestión integral del agua y los recursos naturales asociados al espacio territorial, mediante una interacción pedagógica intersectorial, de saberes locales y conocimientos académicos con un potencial de ser aprendidos y recreados en otras microcuencas.»* (FUNCAGUA, 2024). Mediante un enfoque multidisciplinario se logró llevar a cabo diversos estudios en la microcuenca, detallando características topográficas, hidrológicas, ambientales y sociales. Dentro de estos estudios se realizó un análisis para determinación de plomo mediante el uso de la técnica de espectroscopía de absorción atómica (AA), realizado por los estudiantes Jardel Reyes, Ángel David Escobar, Camila Rivera, Paula Monterroso, Mario Flores, Geisel Girón, Nicolás Lemus, Alejandro Torres y Ángel David Escobar (Barrera, 2024).

Por otro lado, el análisis de metales pesados en cuencas y cuerpos de agua ha sido ampliamente abordado en la literatura, debido a que es una problemática de relevancia ambiental a nivel mundial y persiste la necesidad de mantener un monitoreo frecuente de estos contaminantes. Existen diversas técnicas para la detección de metales pesados, sin embargo, la voltamperometría de redisolución es un método que se caracteriza por su alta sensibilidad, siendo capaz de identificar concentraciones mínimas a nivel traza de metales.

Los estudios enfocados en la detección de trazas de metales pesados en cuencas de ríos y cuerpos hídricos son indispensables y realizados con frecuencia en distintas regiones al rededor del mundo. Algunos ejemplos de investigaciones relacionadas incluyen a el estudio realizado por Jorge Tafur de la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador donde mediante la técnica de voltamperometría de redisolución anódica determinó la presencia de Cd (II), Pb (II) y Hg (II) en aguas residuales mineras, así como el estudio realizado por Daniel Benítez y colaboradores sobre el análisis de Cadmio en aguas residuales publicado en la Revista Cubana de Química. Estos casos demuestran de que la identificación de metales pesados en cuerpos de agua es un tema de preocupación actual y a futuro (Daniel Benítez, 2021) (Tafur, 2016).

### III. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, el acceso al agua sigue siendo un problema de interés actual, donde las enfermedades por consumo de aguas contaminadas recaen principalmente en los sectores poblacionales más pobres. La salud pública se ve afectada por la escasa disponibilidad y el limitado acceso a agua potable de calidad, siendo este uno de los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la ONU. El daño provocado por la baja calidad de agua, no solo se ve limitado a la salud humana, si no que esta afecta directamente a los ecosistemas que dependen de este recurso hídrico (SEGEPLAN, sf).

Guatemala dispone de una oferta abundante de agua, sin embargo, la deficiencia en su gestión y las malas prácticas en su uso, manejo y consumo, afectan la calidad de esta. Igualmente se recalca la falta de leyes que protejan este recurso, causando escases y deficiencias en la calidad del agua disponible. La región metropolitana de Guatemala se refiere a la extensión territorial de la Ciudad de Guatemala y consta de 12 municipios y según el XII Censo Nacional de Población, estas áreas cuentan con una población de 2,834,027 personas. Con forme el área metropolitana de la ciudad se va expandiendo y su población sigue aumentando, la demanda de agua potable crece y, sin embargo, no hay una planificación urbana eficiente para la distribución y tratamiento adecuado del agua (FUNCAGUA, 2022).

La microcuenca del río contreras se encuentra ubicada en la zona 15 de la Ciudad de Guatemala y se encuentra dentro de la cuenca del río Las Vacas. Su estudio es fundamental para identificar problemas ambientales y seguridad hídrica, con ello es posible determinar su estado actual y proponer planes de conservación y recuperación de la calidad del agua (FUNCAGUA, 2024).

Este trabajo busca determinar las concentraciones de metales pesados como el plomo, cadmio y arsénico en suelo, vegetación y agua de la cuenca del río Contreras. La contaminación hídrica por metales pesados es un tema de alta preocupación debido al riesgo que estos representan por su toxicidad y su capacidad de bioacumulación, afectando no solo a los pobladores cercanos a una fuente contaminada sino también a la salud de los ecosistemas (S. E. Pabón, 2020).

En Guatemala existe la norma COGUANOR 29001 que establece valores de características que definen la calidad del agua y si esta es apta o no para el consumo humano. Dentro de ella se define un límite máximo permisible para metales pesados (COPRESAM). Sin embargo, no se cuentan con normas que establezcan límites máximos permitidos para contaminantes en suelo y vegetación (flora silvestre), por lo que se tomó como referencia normas internacionales como los establecidos por EPA y CXS 193-1995.

## IV. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la presencia de cadmio (Cd), arsénico (As) y plomo (Pb) en vegetación, agua y suelo de la microcuenca del río Contreras por medio de voltamperometría de tiras.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de metales pesados (plomo, cadmio y arsénico) en suelo, agua y vegetación.
- Comparar las concentraciones de metales pesados (plomo, cadmio y arsénico) con el límite máximo permisible para compuestos inorgánicos en suelos y vegetación y agua determinados por las normas EPA, CXS 193-1995 y COGUANOR 29001.

## V. HIPÓTESIS

$H_0$ : Las concentraciones encontradas de plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) en agua suelo y vegetación de la microcuenca del Río Contreras no superan los límites máximos permisibles para metales pesados, establecidos por las normas OMS/COGUANOR 29001, EPA y CXS 193-199.

$H_1$ : Las concentraciones encontradas de plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) en agua suelo y vegetación de la microcuenca del Río Contreras superan los límites máximos permisibles para metales pesados, establecidos por las normas OMS/COGUANOR 29001, EPA y CXS 193-199.

## VI. MARCO TEÓRICO

### A. METALES PESADOS

Los metales pesados son aquellos elementos químicos de densidad alta en la tabla periódica ( $>4g/cm^3$ ), masa y peso atómico mayor a 20g y que son tóxicos en bajas dosis. Estos metales se pueden encontrar naturalmente en el ambiente en concentraciones en las que no afecta significativamente a la vida. Algunos ejemplos de estos elementos son: Hierro (Fe), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Zinc (Zn), entre otros.

Una de sus principales características es que no pueden ser degradados o destruidos con facilidad. Generalmente se conoce que estos compuestos tienen efectos adversos en la salud debido a su capacidad de bioacumulación, interacción con otros metales y su toxicidad en altas concentraciones. Sin embargo, algunos de estos metales como pueden ser el Zinc (Zn) son esenciales en la dieta y su deficiencia puede llevar a problemas de salud. Por otro lado, existen aquellos metales pesados que no cumplen con una función biológica como el Mercurio (Hg) y es recomendado evitarlos siempre (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016).

## 1. Plomo

El Plomo es el elemento de número atómico 82 en la tabla periódica, con una masa atómica de 207.2 g/mol y una densidad de 11.3g/cm<sup>3</sup>. Se caracteriza por su capacidad de formar sales, óxidos y compuestos organometálicos.

El Plomo es ampliamente utilizado en baterías, soldaduras y gasolina. Su exposición puede verse a través de la inhalación de partículas generadas por la combustión de materiales que presenten este metal; y por la ingesta directa de este por medio de alimentos o agua contaminada (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016) (OPS, sf). El plomo se distribuye por el cuerpo, alcanzando órganos vitales como el cerebro y el hígado, así como su capacidad de impregnarse en el sistema óseo. Este se deposita en dientes y huesos donde se va acumulando con el paso del tiempo y posteriormente es transmitido al torrente sanguíneo (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016) (OPS, sf). Los niños son especialmente vulnerables a los efectos neurotóxicos del plomo, incluso cuando estos se ven expuestos a concentraciones bajas que no representarían un mayor peligro para una persona adulta, debido a la capacidad de los infantes de absorber una mayor cantidad de plomo (OPS, sf).

## 2. Cadmio

El Cadmio es el elemento de número atómico 48 en la tabla periódica, de masa atómica de 112.41 g/mol y una densidad de 8.69g/cm<sup>3</sup>. Este se caracteriza por presentar 11 isótopos inestables y 8 isótopos estables (PRTR, sf).

Este elemento se encuentra de forma natural en la corteza terrestre y comúnmente se encuentra como un mineral, en combinación con otros elementos y no como elemento puro. El cadmio es un subproducto de la industria minera, tras la extracción de otros metales como el zinc. Este se utiliza principalmente en productos como baterías, recubrimientos, pigmentos y producción de fertilizantes (PRTR, sf) (ATSDR, 1999) (Lodoño, Lodoño, &

Muñoz, 2016). Las principales fuentes de exposición al cadmio son los cigarrillos, los alimentos contaminados y la exposición por liberación del metal al aire.

El cadmio que entra al cuerpo mayoritariamente se acumula en órganos como el hígado y los riñones. Solamente un pequeño porcentaje del cadmio que ingresa es eliminado por el cuerpo por medio del sistema urinario (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016). Este elemento es tóxico, cancerígeno y teratogénico. Se ha asociado al cáncer de pulmón por inhalación por polvos y vapores, así como por su consumo directo mediante cigarrillos, ya que el este se acumula en las hojas de tabaco (ATSDR, 1999).

### 3. Arsénico

El Arsénico es el elemento de número atómico 33, con masa atómica de 74 g/mol y una densidad de  $5.75 \text{ g/cm}^3$ . Este se caracteriza por sus propiedades metálicas y no metálicas, siendo clasificado como un metaloide. El arsénico presenta tres estados alotrópicos: gris, amarillo y negro (ASTDR, 2007).

El arsénico puede clasificarse como inorgánico, si este está combinado con elementos como el oxígeno, cloro y azufre; u orgánico, cuando este se encuentra combinado con carbono e hidrógeno. El arsénico inorgánico se encuentra principalmente en el suelo de manera natural. Se utiliza principalmente en productos agrícolas, pesticidas, tratamiento de madera (ASTDR, 2007) (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016).

Los alimentos son la fuente principal del ingreso de arsénico al cuerpo y los mariscos son los alimentos que contienen una cantidad de arsénico orgánico más alta. La mayor parte del arsénico que entra al cuerpo pasa al torrente sanguíneo. La exposición prolongada causa lesiones cutáneas y lesiones vasculares (ASTDR, 2007) (Lodoño, Lodoño, & Muñoz, 2016).

## B. CONTAMINACIÓN DE CUERPOS DE AGUA

Actualmente una de las mayores problemáticas a atender es la contaminación del agua. El agua es un recurso que es indispensable para la supervivencia de los seres humanos, animales, plantas y para la estabilidad de los ecosistemas. Sin embargo, el acceso a esta se ve limitada o muchas otras veces se accede a agua contaminada, poniendo en riesgo la salud del consumidor.

La contaminación puede darse de una manera directa, cuando estos contaminantes son vertidos directamente en un cuerpo de agua, o de una manera indirecta, cuando los contaminantes llegan a un cuerpo de agua por medio de arrastre. Esta agua contaminada puede a su vez, contaminar otras fuentes de agua mediante su desplazo y polucionando por ende los alrededores que se encuentran en su paso (FUNCAGUA, 2024).

Existe una preocupante contaminación de aguas superficiales en las áreas urbanas del país, donde los principales factores contaminantes son las aguas residuales, actividades agropecuarias, actividad industrial y agroindustrial y contaminación proveniente de basureros. Cabe recalcar que en Guatemala a nivel nacional únicamente el 3% de las aguas residuales son tratadas. También influye la falta de tratamiento en los vertederos municipales y la creación de basureros clandestinos (Galindo, 2018). La mayoría de estas aguas superficiales no cuentan con una planta de tratamiento. Según el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) dentro del territorio guatemalteco existen 189 plantas de tratamiento, de las cuales únicamente el 62% se encuentran en funcionamiento (Galindo, 2018).

La contaminación por metales pesados son un problema para los habitantes debido a su toxicidad, estos metales pueden llegar a distintos cuerpos de agua por medio de residuos industriales sin tratar y otras actividades antropogénicas (Méndez, González, Román, & Prieto, 2009). La principal vía de entrada de los metales pesados es en la ingesta, ya sea la ingesta directamente del agua contaminada o de plantas y animales que se ven afectados por estas fuentes hídricas (Olmos & Olmos, 2022). De las principales

características de contaminación en las plantas por metales pesados es el crecimiento anormal de las mismas y el amarillamiento de las hojas (clorosis). En los seres vivos los principales efectos secundarios pueden ser úlceras, problemas respiratorios y dermatológicos, cáncer, daño del sistema nervioso, entre otros. Esto se debe a la capacidad de los metales pesados de bioacumulación (Pabón, Benítez, Sarria, & Gallo, 2020). La bioacumulación se define como la capacidad de una sustancia de aumentar en concentración dentro de un organismo conforme pasa el tiempo (Méndez, González, Román, & Prieto, 2009).

### C. CONTAMINACIÓN EN SUELOS

El suelo es un componente fundamental en espacios rurales y urbanos, su preservación ayuda a asegurar su calidad y la evasión de la degradación del suelo. Actividades como la minería, la industria manufacturera y el uso de agentes como pesticidas, pintura y desechos industriales pueden resultar en la contaminación del suelo con metales pesados. La liberación de metales pesados al suelo de forma natural puede suceder por medio de fenómenos como terremotos y actividad volcánica, aunque estos raramente llegan a liberar sustancias a niveles tóxicos (EPA, 2000).

La acumulación de contaminantes como metales pesados en suelos es tóxica para seres humanos o animales que consuman productos vegetales que hayan crecido en suelos contaminados. La exposición prolongada a estos metales genera problemas crónicos en la salud. Metales como el plomo pueden causar problemas en la salud mental, el cadmio afecta directamente a los riñones y el sistema gastrointestinal y el arsénico genera reacciones cutáneas, así como afecta a los riñones y el sistema nervioso central (EPA, 2000).

La movilidad de un metal depende de su especiación, así como también de las características del suelo, como puede ser el pH, materia orgánica y presencia de otros elementos. Generalmente los metales pesados tienen una baja movilidad por lo que se quedan acumulados en las superficies. Los metales pesados suelen tener mayor

disponibilidad en un pH ácido que en uno alcalino y los suelos arcillosos suelen retener o adsorber los metales pesados (Galán & Romero, 2008).

#### D. CONTAMINACIÓN EN VEGETACIÓN

Es conocida la toxicidad que representan los metales pesados en la salud humana y animal. La contaminación de estos en alimentos vegetales es una preocupación constante en la seguridad alimentaria, por lo que mantener un monitoreo constante es necesario para controlar la presencia de estos en los alimentos que llegan a los hogares de las comunidades.

Las plantas pueden absorber estos metales que llegan a ellas a través del suelo contaminado, agua contaminada o por su aplicación directa como en pesticidas que contengan metales pesados. Las plantas absorben estos metales a través de sus raíces, la absorción y bioacumulación de los metales en los organismos vegetativos va a depender de la movilidad de los metales (Méndez, González, Román, & Prieto, 2009) (CSA, 2023).

Algunos metales como el manganeso o el zinc son indispensables como nutriente de las plantas, pues es conocido de que algunos metales son prescindibles en procesos de activación enzimática y el metabolismo vegetal (Méndez, González, Román, & Prieto, 2009). Un contenido anormal de metales pesados causa efectos adversos en las plantas como puede ser un crecimiento anormal, desarrollo deficiente, alteraciones celulares como en cloroplastos y mitocondrias, alteración de su proceso de fotosíntesis o efectos secundarios como el descenso poblacional de especies microbianas que fertilizan el suelo (Ejaz et al, 2023).

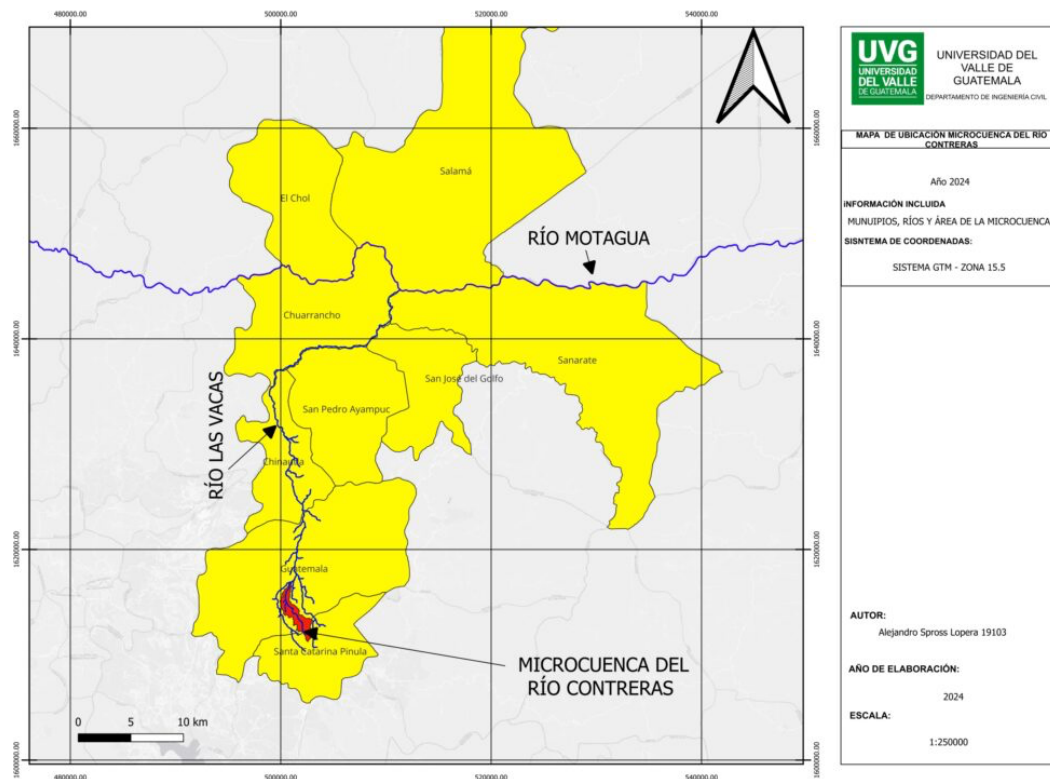
#### E. RÍO CONTRERAS

El río Contreras tiene un área de 5.56 kilómetros cuadrados y abarca una longitud de 6.54 kilómetros, abarcando la zona 15 capitalina y se encuentra dentro de la cuenca del río Las Vacas. La microcuenca al estar dentro del área urbana de la ciudad se ve afectada

por contaminación por actividades como desechos de aguas residuales, construcción y desechos como basura (FUNCAGUA, 2024) (Barrera, 2024).

La microcuenca abarca desde Santa Catarina Pinula, pasando distintas zonas de la ciudad y desemboca en zona 5, uniéndose con el río La Campana. La existencia de esta microcuenca en la ciudad permite que la distribución del agua sea más uniforme en época lluviosa, cuando hay un aumento de precipitación. De este modo ayuda a la amortiguación y disminución de riesgo de inundaciones en el área, cumpliendo con su función de sistema de drenaje natural.

Figura 1. *Mapa de ubicación del río Contreras*



*Nota. Spross, A. (2024). Mapa de ubicación microcuenca del río Contreras. FUNCAGUA. <https://funcagua.org.gt/proyecto-microcuenca-pedagogica-del-rio-contreras/>*

## F. NORMATIVAS Y LÍMITES

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido límites de presencia de metales pesados en agua potable, esto con la finalidad de establecer un parámetro que asegure la calidad del agua y determinación si esta es apta para el consumo (OMS, 2018). Para los metales pesados de interés son los siguientes:

Cuadro 1. Límites de metales pesados en agua OMS

Compuesto	Límite
Plomo	0.01mg/L
Cadmio	0.003mg/L
Arsénico	0.01mg/L

*Nota. Límites máximos permitidos de Pb, Cd y As en agua potable, según la Organización Mundial de la Salud.*

Existe la Norma Internacional de los Alimentos CXS 193-1995, que determinan el límite máximo permitido de diferentes contaminantes en productos vegetales para el consumo humano (Alimentarius, 2023). No existen valores específicos para vegetación silvestre por lo que se tomarán como referencia los siguientes valores:

Cuadro 2. Límites máximos permitidos en algunos productos vegetales

Nombre	Compuesto	Límite
Hortalizas de hoja	Plomo	0.3 mg/Kg
Hortalizas de hoja	Cadmio	0.2 mg/Kg
Arroz pulido	Arsénico	0.2 mg/Kg

*Nota. Límites máximos permitidos de Pb, Cd y As en algunos productos vegetales, según la Norma Internacional de los alimentos CXS 193-1995.*

La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos establece límites de contaminantes de metales pesados en suelo (EPA, 2000). Los valores de interés que se tomarán como referencia son:

Cuadro 3. Límites de metales pesados en suelos EPA

Compuesto	Límite
Plomo	420 mg/kg
Cadmio	85 mg/kg
Arsénico	75 mg/kg

*Nota. Límite máximo permitido de Pb, Cd y As en suelos, según la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos.*

En Guatemala se cuenta con la norma COAGUANOR 29001 que establece los valores de características que definen si la calidad del agua es apta para el consumo humano (COPRESAM, sf). Para los metales pesados de interés, la norma establece los siguientes valores:

Cuadro 4. Límite máximo permitido de metales pesados en agua COAGUANOR 29001

Compuesto	Límite
Plomo	0.001mg/L
Cadmio	0.003mg/L
Arsénico	0.010mg/L

*Nota. Límites máximos permitidos de Pb, Cd y As en agua, según la norma COAGUANOR 29001.*

Actualmente en Guatemala no existen normativas específicas que regulen y establezcan límites máximos permisibles de contaminantes como los metales pesados en diferentes matrices ambientales como el suelo y la vegetación. Esta falta de regulación representa una limitante significativa para la evaluación del impacto de contaminantes en los ecosistemas y la salud pública. Ante esta situación se recurre a normas internacionales

como los anteriormente mencionados, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y CXS 193-1995 (CODEX) para tener un valor límite de referencia.

## G. MÉTODOS DE DETECCIÓN

Existen diversos métodos para realizar detección de metales pesados. La espectrometría de absorción atómica (AA) es uno de los métodos más utilizados debido a su simplicidad, eficiencia y un bajo costo comparado con otros métodos analíticos. Esta se basa en que los átomos de un determinado elemento en su estado basal, absorben la energía emitida por una fuente de excitación del mismo elemento. Los átomos del analito son convertidos a su estado atómico mediante llama o atomización electrónica. Posteriormente se realiza la lectura de la luz absorbida a una longitud de onda específica de cada elemento (Skoog, 2015).

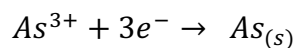
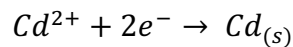
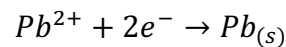
La espectrometría de masas con plasma acoplado (ICP-MS) es un método analítico utilizado para la detección de metales pesados, se caracteriza por su análisis multielemental y su capacidad de detectar elementos a nivel traza debido a su alta sensibilidad. Las partes del equipo se basan en el acoplamiento de un método para generar iones de un elemento (plasma acoplado) y un método que separa y detecta los iones generados (espectrómetro de masas). Sin embargo, su principal desventaja es su alto costo comparado con otros métodos (Skoog, 2015) (UBU, 2022).

### 1. Voltamperometría de tiras

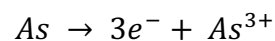
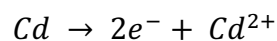
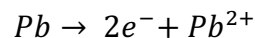
La voltamperometría de tiras, también conocida como voltamperometría de redisolución es una técnica electroquímica para la determinación de analitos en una solución. Esta se conoce por ser altamente precisa y sensible, con la capacidad de alcanzar límites de detección del orden de partes por billón (ppb) (Romero, Vera, Redrovan, Jumbo, & Pesantez, 2019) (PalmSens, 2016). Se le conoce como voltamperometría de tiras debido al uso de electrodos desechables en forma de tiras.

Es comúnmente utilizada para analizar metales en solución y se distingue por su capacidad de determinar varios metales en un solo experimento y de detectar analitos a nivel traza. En la voltamperometría de redisolución anódica (ASV) se combina una etapa de preconcentración del analito sobre el electrodo, junto con una etapa de barrido donde se realiza la medición de la señal generada (Romero, Vera, Redrovan, Jumbo, & Pesantez, 2019).

Durante la etapa de preconcentración del electrodo, se aplica un potencial lo suficientemente negativo (catódico), donde se reducen los iones metálicos presentes en solución, depositándose como metales elementales y formando una película sobre el electrodo (PalmSens, 2016).



Seguido de la etapa de preconcentración, ocurre la etapa de redisolución, donde se aplica un potencial positivo (anódico) que oxida los metales depositados, regresándolos a su forma iónica. Esto genera una corriente que es proporcional a la concentración del analito depositado, cada metal genera un pico de corriente característico (PalmSens, 2016).



Cada metal posee un pico característico, permitiendo su identificación y cuantificación. En este caso se implementará adicionalmente la técnica voltamperometría de onda cuadrada (SWV) donde se aplica un barrido de potencial lineal combinado con un perfil de impulsos, permitiendo una mayor sensibilidad y resolución (PalmSens, 2016). La

señal emitida por cada metal se puede ser afectada si existe la presencia de otros analitos en la muestra, causando interferencias (PalmSens, 2016).

## VII. METODOLOGÍA

### A. SUJETO DE ESTUDIO

Suelo, agua y vegetación de la microcuenca del río Contreras, ubicado en la zona 15 capitalina.

### B. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Es una investigación de tipo cuantitativo, con un diseño descriptivo exploratorio y con un tipo de muestreo no probabilístico por conveniencia. Con esto se busca obtener una representación de la microcuenca basado en la accesibilidad y carácter exploratorio.

### C. TIPO Y TAMAÑO DE MUESTRA

La zona de muestreo se dividió en tres puntos de recolección en la microcuenca del río Contreras, los cuales fueron seleccionados por su accesibilidad en el terreno. En cada punto se recolectaron tres muestras de cada matriz (agua, suelo y vegetación) teniendo un total de 27 muestras: 9 de agua, 9 de suelo y 9 de vegetación.

## D. DISEÑO DE MUESTREO

Se realizó un muestreo por conveniencia, en tres puntos dentro de la cuenca. Al momento de realizar la recolección de muestras se capturaron fotografías en los puntos de recolección para la documentación y se contó con la presencia de testigos en el lugar.

### 1. Muestras de agua

Para la recolección de las muestras de agua se utilizó un recipiente de polipropileno de 16 oz. Se retiró la tapa, orientando la boca del recipiente corriente arriba, para luego sumergir el recipiente en su totalidad y girarlo en dirección de la corriente y descartar el agua recolectada. Este proceso de enjuague se realizó tres veces antes del llenado definitivo. Se procuró que el recipiente estuviera bien sellado y se colocó en una nevera portátil para su traslado. (DESI, 2018).

### 2. Muestras de suelo

Para la recolección de muestras de suelo se utilizaron recipientes de polipropileno estériles. La materia orgánica se retiró de la superficie y con ayuda de una pala de acero inoxidable se realizó un corte de aproximadamente 20cm de profundidad. En ella se tomaron tres muestras en diferentes profundidades: 0-10cm y 10-20cm. Se recolectó un aproximado de 30g de tierra, posteriormente se tapó el recipiente y se colocó en una nevera portátil para su transporte. (Achara, 2018).

### 3. Muestras de vegetación

Para la recolección de vegetación se utilizaron recipientes de polipropileno estériles. Se utilizaron hojas de plantas que visiblemente estuvieran sanas, es decir, que no presentaran decoloración, insectos, daños superficiales y se excluyó el tallo. No se realizó

una identificación taxonómica de las especies muestreadas. Con una tijera de acero inoxidable se cortaron las hojas hasta tener unos 10g de muestra fresca. Posteriormente se tapó el recipiente y se colocó en una nevera portátil para su transporte. (Achara, 2018).

#### 4. Codificación de muestras

Para facilitar la organización se implementó una codificación alfanumérica de las muestras. Cada muestra fue identificada con un código donde se indica: el tipo de matriz (agua, suelo o vegetación), número de muestra y punto de recolección. Para cada matriz se utilizaron las siguientes abreviaciones:

- MA: Muestra de agua.
- MV: Muestra de vegetación.
- MT: Muestra de tierra (suelo).

Por ejemplo, el código MA1P1 corresponde a la Muestra de Agua 1, recolectada en el Punto 1. De este modo se indica el número de muestra correspondiente (1, 2 o 3) y el punto en el que fue recolectado (Punto 1, punto 2 o punto 3).

#### E. BIOSEGURIDAD Y DESECHOS

Debido a que las muestras, especialmente las de agua, provienen de una fuente contaminada, fue necesario implementar medidas de bioseguridad con el fin de evitar la exposición a patógenos y toxinas. Durante el muestreo se utilizó equipo de protección personal, incluyendo guantes de nitrilo y botas de agua (Flores, 2019).

Durante el trabajo en el laboratorio se siguieron protocolos de buenas prácticas de laboratorio, como el uso de campanas de extracción al manejar ácidos, neutralización de soluciones antes de descartar y el uso de un recipiente de desechos propiamente rotulado e indicando la presencia de los metales analizados (Plomo, cadmio y arsénico). Así como el uso de protección personal como bata de laboratorio, guantes de nitrilo, gafas de laboratorio y ropa adecuada que cubriera las extremidades inferiores. Los desechos con contenido

biológico, como gazas, filtros y sobrantes de muestras fueron tratadas con cloro antes de su desecho en ecotermo. Estas medidas de seguridad aseguran el bienestar de investigador y el correcto tratamiento de los residuos (Flores, 2019).

Los desechos de metales pesados se clasifican como desechos peligrosos debido a su potencial de causar daños ambientales y representar un peligro para la salud. Los desechos fueron neutralizados previo a su almacenamiento en un recipiente propiamente rotulado, indicando los metales que se contenían, para su posterior recolección por parte de la empresa encargada de residuos. Dado a que los metales pesados no son biodegradables ni se destruyen, el tratamiento consiste en: estabilización y precipitación de los iones metálicos y su posterior disposición en rellenos sanitarios, encapsulación, confinamiento o una combinación de estas. Los desechos peligrosos en Guatemala están supervisados por MARN, actualmente Guatemala se encuentra dentro del Acuerdo de Basilea que categoriza e indica la eliminación adecuada de desechos peligrosos (MARN, sf) (PNUMA, sf) (MSPAS, 2006).

## F. VARIABLES

### 1. Independientes

- Sujeto de muestra (agua, suelo y vegetación).
- Localización geográfica.
- Puntos representativos.

### 2. Dependientes

- Concentración de plomo (Pb).
- Concentración de Cadmio (Cd).
- Concentración de arsénico (As).

## G. MATERIALES

### 1. Equipo

- Potenciostato  $\pm 0.005V$
- Software PSTrace
- Sensor ItalSens IS-HM1  $\pm 5\%$
- Cable sensor y conector
- Agitador magnético
- Computadora
- Balanza analítica  $\pm 0.002g$
- Estufa de secado  $\pm 1^{\circ}C$
- Refrigerador  $\pm 1^{\circ}C$
- Plancha de aislamiento
- Estufa calentadora
- Mortero
- Tamiz de polipropileno

### 2. Reactivos

- Solución estándar Plomo SPEX 10,000 ppb
- Solución estándar Cadmio 10,000 SPEX ppb
- Solución estándar Arsénico SPEX 10, 000 ppb
- Ácido clorhídrico JT BAKER 37%
- Ácido clorhídrico MERK 30%
- Ácido nítrico MERK 65%
- Ácido clorhídrico 6M
- Ácido clorhídrico 20mM
- Ácido nítrico 1/10
- Peróxido de hidrógeno MERK 30%

### 3. Cristalería

- Matraces aforados 10ml  $\pm 0.02ml$
- Matraz aforado 50ml  $\pm 0.06ml$
- Matraz aforado 25ml  $\pm 0.03ml$
- Beaker 250ml  $\pm 5\%$
- Probeta 25ml  $\pm 0.03ml$
- Micropipeta 200  $\mu l \pm 0.35\mu l$
- Micropipeta 1,000  $\mu l \pm 1.1\mu l$
- Cisoles
- Frascos de almacenamiento de FEP con rosca ETFE
- Piseta

## H. PROCEDIMIENTO

### 1. Preparación de soluciones

Se preparó 50ml de una solución 6M de *HCl* 37%, a partir de esta se preparó 25ml de una solución *HCl* 20mM para la limpieza del electrodo (PalmSens, 2022).

Para la limpieza de cristalería es necesario el uso de una solución 1/10 de *HNO*<sub>3</sub> 65% (1 parte ácido / 9 agua destilada). La cristalería se dejó reposar en solución por 24h para la eliminación de cualquier traza de metal. Luego, la cristalería se enjuagó con agua del grifo, seguido de 3 enjuagues con agua destilada previamente a su uso. Este proceso de cristalería se debe realizar antes y después de cada uso (SUIC, 2020).

Se preparó 10ml de una solución 5,000 ppb de Pb, a partir de un estándar comercial de 10,000 ppb. Esta solución fue acidificada con 10 $\mu$ l de *HCl* 6M. Este proceso se repitió para la elaboración de los estándares de Cd y As, todos fueron realizados a la misma concentración, acidificados y aforados a 10ml (PalmSens, 2022).

## 2. Preparación de muestras

### a) Agua

Para la conservación de las muestras acuosas previo al análisis se acidificó con HCl 6M hasta alcanzar un pH <2.5 y se dejaron reposar (PalmSens, 2022). Para el tratamiento de las muestras acuosas se siguió el procedimiento del método EPA 200.8, las muestras pasaron por un primer filtrado con una gaza estéril para descartar rocas y partículas grandes, luego, fueron filtradas nuevamente a través de un filtro de 45nm (EPA, 1994).

Se tomó un volumen de 250ml de muestra y se redujo a un volumen <10ml. Esto se transportó a un balón y se aforó a 10ml y nuevamente se ajustó el pH con 10µl de HCl 6M. Esto se realizó con el objetivo de concentrar la presencia de metales disueltos.

### b) Suelo y vegetación

En el caso de las muestras de suelo y vegetación, estas se mantuvieron en refrigeración a 4° C hasta el momento de su uso en tratamiento (EPA, 1994).

Para la determinación de metales pesados en las matrices de suelo y vegetación, las muestras fueron transferidas a crisoles y secadas en un horno Froilabo Air Expert a 60 °C. Posteriormente, se procedió a su homogenización, mediante la molienda de los mismismos en un mortero, seguida de tamizado en un tamiz de polipropileno de malla 5 (apertura de 2mm) (EPA, 2007).

Para las muestras de suelo, se pesó ~0.2g de muestra seca en los tubos de digestión, luego se adicionaron 9ml de HNO<sub>3</sub> 65% y 3ml de HCl 30%, junto con la realización de un blanco con dichos ácidos sin muestra agregada. Los tubos digestivos fueron cerrados herméticamente (EPA, 2007).

La digestión de microondas fue realizada en un equipo ETHOS UP, con rotor de alta presión SK-15 con controles de temperatura y presión con el siguiente programa:

Cuadro 5. Programa de digestión ácida para muestras de suelo en equipo ETHOS UP

Paso	Tiempo	T1	Potencia
1	00:10:00	180°C	1800W
2	00:10:00	180°C	1800W

*Nota. Parámetros aplicados en el proceso de digestión ácida de muestras de suelo, especificando el tiempo, potencia y temperatura de cada etapa del procedimiento.*

Luego de la digestión, las muestras fueron filtradas para descartar sílice no digerido y aforadas a 25ml con agua destilada para posteriormente ser trasvasadas a tubos Falcon para su transporte.

Para las muestras de vegetación se pesó ~0.5g de muestra seca en los tubos de digestión, luego se adicionaron 8ml de  $HNO_3$  65% y 2ml de  $H_2O_2$  30%, junto con la preparación de un blanco con la combinación de ácido y peróxido sin adición de muestra (Milestone, 2018). La adición de peróxido de hidrógeno es necesaria para la digestión de muestras orgánicas. Los tubos fueron sellados herméticamente y colocados en el equipo de ETHOS UP, con rotor de alta presión SK-15 con controles de temperatura y presión y el siguiente programa:

Cuadro 6. Programa de digestión ácida para muestras de vegetación en equipo ETHOS UP

Paso	Tiempo	T1	Potencia
1	00:15:00	200°C	1800W
2	00:15:00	200°C	1800W

*Nota. Parámetros aplicados en el proceso de digestión ácida de muestras de vegetación, especificando el tiempo, potencia y temperatura de cada etapa del procedimiento.*

Las muestras digeridas fueron filtradas nuevamente para eliminar residuos y aforadas a 25ml con agua destilada para posteriormente ser trasvasadas a tubos Falcon para su transporte.

Previo al análisis, se tomaron 10ml de cada muestra digerida (suelo y vegetación) y fueron evaporadas a sequedad. La evaporación fue realizada lentamente y a baja temperatura, cuidando que la muestra no se quemara. Posteriormente, fueron aforadas nuevamente a 10ml y acidificadas con  $HCl$  6M. Este proceso de evaporación a sequedad y re-aforo fue realizado debido a que las muestras se encontraban con un pH muy ácido, además de la presencia de  $HNO_3$  que destruye la película del electrodo. Para evitar agregar agentes neutralizadores, aumentar el pH  $< 2.5$  y eliminar los nitratos, se optó por esta medida.

## I. EQUIPO

### 1. Descripción y cuidados del equipo

Para la detección de Pb, Cd y As en las muestras de agua, suelo y vegetación se utilizó el potenciostato portátil Sensit Smart de PalmSens. Este permite realizar análisis de voltamperometría de redisolución anódica, donde los analitos pasan por una etapa de preconcentración sobre el electrodo, siendo posteriormente oxidados en la etapa de redisolución donde utilizó la técnica de barrido de potencial de voltamperometría de onda cuadrada (PalmSens, 2016).

Se utilizó el software PSTrace para la configuración de parámetros, el control del equipo y las lecturas de las mediciones. En conjunto se utilizaron electrodos Italsens IS-HM, una celda electroquímica que se constituye por un electrodo circular de grafito, un electrodo de referencia de plata y un contraelectrodo de grafito. Este electrodo de trabajo cuenta con un recubrimiento de polímero que contiene iones de mercurio (PalmSens, 2016).

Para la manipulación de los electrodos Italsens IS-HM se utilizaron guantes, para evitar contaminación por manipulación directa, al igual que se mantuvieron almacenados en un lugar seco y sin exposición al aire y a la luz solar. El uso de  $HNO_3$  en muestras y

blancos no es recomendado ya que puede inactivar la película del electrodo, en su lugar el fabricante recomienda el uso de *HCl* (PalmSens, sf). Estos electrodos son en formato desechables, se utiliza y se recorta un electrodo por muestra.

## 2. Análisis de muestras

Como primer paso se realizó la limpieza del electrodo. Para ello se abrió el archivo “Conditioning bundle”, se recortó una tira y se insertó con precaución en el potenciostato. Se llenó la celda con la solución de limpieza de *HCl* 20mM en agitación magnética. El sensor se sumergió en la solución asegurándose que todos los electrodos estuvieran cubiertos.

Este proceso de limpieza se mantiene por 15min o hasta que los picos de voltamperometría se estabilicen. El acondicionamiento del electrodo consta de dos pasos; el primer paso cuenta con un periodo prolongado de deposición, en el segundo paso, el tiempo de deposición se reduce y el método se repite por 10 ciclos. Los parámetros para la limpieza son los siguientes (PalmSens, 2022).

Cuadro 7. Prámetros para limpieza del electodo

Parámetro	Valor
Técnica	Voltamperometría de onda cuadrada
Ranco actual	1 $\mu$ A-100 $\mu$ A
E cond	-0.18
t cond	30
E dep	-1.1
t dep	300
t eq	10
E comenzar	-1.1
E terminar	-0.15
E paso	0.005
Amplitud	0.025
Frecuencia	15.0

*Nota. Parámetros para el primer paso de acondicionamiento del electrodo ItalSens IS-HM usando el software PSTrace. Estos pueden ser ingresados de forma manial o descargar el paquete brindado por Palm Sens bajo el nombre del archivo “Conditioning Bundle”.*

Cuadro 8. Prámetros para limpieza del electrodo

Parámetro	Valor
Técnica	Voltamperometría de onda cuadrada
Ranco actual	1 $\mu$ A-100 $\mu$ A
E cond	-0.18
t cond	30
E dep	-1.1
t dep	0
t eq	10
E comenzar	-1.1
E terminar	-0.15
E paso	0.005
Amplitud	0.025
Frecuencia	15.0

*Nota. Parámetros para el segundo paso de acondicionamiento del electrodo ItalSens IS-HM usando el software PSTrace. Estos pueden ser ingresados de forma manial o descargar el paquete brindado por Palm Sens bajo el nombre del archivo “Conditioning Bundle”.*

Terminada la limpieza, se retiró la celda con la solución de limpieza. Luego se abrió el archivo “HM1 Standard Addition river Water” y se colocó una nueva celda con el blanco (solución sin analito), se sumergió nuevamente el electrodo y se tomó la lectura correspondiente. Seguido de esto, se colocó una nueva celca que contenía la muestra a analizar (suelo, agua o vegetación), repitiendo los pasos de sumergir el electrodo y lectura. Finalizada la lectura de muestra, se dio inicio a las adicones de estándar. Se realiza una adición de 150ul de cada estándar de concentración 5,000ppb (Analito plomo, cadmio y arsénico), teniendo un total de tres adiciones en cada lectura. Este proceso de adición se ejecutó tres veces más.

El método de adición de estándares se utilizó para todas las muestras (agua, suelo y vegetación), con el objetivo de construir la curva de calibración sobre cada muestra, donde el software PStTrace compara las alturas de los picos, calculando la cantidad de analito presente en cada muestra (PalmSens, 2022). Este método permite reducir posibles efectos de matriz que pueden afectar la lectura, la adición de volúmenes de una solución de concentración conocida permite una cuantificación más precisa. La lectura de muestras se trabajó en duplicado. Los parámetros para la lectura y adición son los siguientes (PalmSens, 2022).

Cuadro 9. Parámetros de lectura de muestras

Parámetro	Valor
Técnica	Voltamperometría de onda cuadrada
Rango actual	1 $\mu$ A-100 $\mu$ A
E cond	-0.12
t cond	45
E dep	-1.15
t dep	120
t eq	10
E comenzar	-1.1
E terminar	-0.1
E paso	0.005
Amplitud	0.025
Frecuencia	25.0

*Nota. Parámetros para la lectura de muestras con electrodo ItalSens IS-HM usando el software PStTrace. Estos pueden ser ingresados de forma manual o descargar el paquete brindado por Palm Sens bajo el nombre del archivo “HMI Standard Addition river Water”.*

Figura 2. Parámetros de adición de estándares

Technique:

Measurement Peaks Analysis BiPot

Determination  
 Standard addition  Calibration ?

Analytes  
 Concentration unit:   
 Added volumes in  $\mu\text{l}$   Concentration in cell

	Analyte	Analyte	Analyte	Analyte
► Id	As	Pb	Cd	
Sol nr.	1	2	3	9
Conc	5000	5000	5000	10
St. 1	150	150	150	10
St. 2	300	300	300	10
St. 3	450	450	450	10
St. 4	600	600	600	10

Volumes  
 Sample volume (ml):   
 Cell volume (ml):

Peak Settings  
 Use value:  height  area  sum of slopes

	E peak	Auto	E left	E right
► As	-0.31	<input type="checkbox"/>	-0.37	-0.25
Pb	-0.55	<input type="checkbox"/>	-0.6	-0.4
Cd	-0.75	<input type="checkbox"/>	-0.805	-0.68
		<input type="checkbox"/>		

*Nota. Parámetros para adición de estándares en muestra. Se define el analito en cada columna. En la fila “Sol nr.” Se colocan los números 1, 2 y 3 para indicar que los analitos se encuentran en soluciones separadas. En la fila “Conc” se indica la concentración del analito en solución. En las filas “St.1, St.2, St.3 y St.4” se indica el volumen agregado a la muestra de cada analito, estas son acumulativas (PalmSens, 2022).*

Para la creación de las curvas de calibración se realiza el mismo procedimiento de adición de estándares. La adición de analitos se realiza sobre un blanco sin muestra y cambiando de “Standard addition” a la opción de “Calibration”. Es importante hacer este cambio, ya que de otro modo, el equipo reconocerá el blanco como muestra.

## VIII. RESULTADOS

Cuadro 10. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de agua

Muestra	Plomo (ppb $\pm$ 0.05)	Cadmio (ppb $\pm$ 0.04)	Arsénico (ppb $\pm$ 3.80)
MA1P1	2.12	0.59	17.27
MA2P1	0.75	0.85	40.68
MA3P1	1.09	0.77	58.30
MA1P2	1.23	0.91	31.67
MA2P2	0.80	0.70	15.73
MA3P2	0.93	0.87	101.79
MA1P3	0.74	0.61	360.36
MA2P3	0.43	0.61	16.07
MA3P3	0.85	1.08	35.09

*Nota. Se presentan las medias de las concentraciones reales encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de agua, mediante el uso de Voltamperimetría de redisolución anódica, identificadas por: tipo de muestra, número de muestra y punto de muestreo. Ejemplo de cálculo de concentración real en la sección de anexos, ecuación 7.*

Cuadro 11. Variación entre duplicados en matriz de agua

Muestra	%RPD Plomo	%RPD Cadmio	%RPD Arsenico
MA1P1	95.18	1.60	24.41
MA2P1	81.87	15.82	23.95
MA3P1	19.76	9.24	5.64
MA1P2	16.03	2.45	60.49
MA2P2	0.89	12.84	N/A
MA3P2	23.64	11.55	13.99
MA1P3	N/A	N/A	N/A
MA2P3	N/A	N/A	N/A
MA3P3	N/A	N/A	N/A

*Nota. Se presenta la variación de lecturas de plomo, cadmio y arsénico (%RPD) entre los duplicados de las muestras de agua, mediante el uso de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo %RPD en la sección de anexos, ecuación 1.*

Cuadro 12. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de suelo

Muestra	Plomo (ppb $\pm$ 0.87)	Cadmio (ppb $\pm$ 0.19)	Arsénico (ppb $\pm$ 5.4)
MT1P1	31.59	19.32	355.5
MT2P1	57.13	12.57	405.6
MT3P1	42.42	14.71	413.1
MT1P2	25.93	7.80	521.4
MT2P2	10.04	14.34	344.8
MT3P2	43.67	16.47	396.7
MT1P3	127.8	13.21	440.3
MT2P3	199.4	23.51	408.9
MT3P3	70.06	11.61	509.9

*Nota. Se presentan las medias de las concentraciones reales encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de suelo, mediante el uso de Voltamperometría de redisolución anódica, identificadas por: tipo de muestra, número de muestra y punto de muestreo.*

Cuadro 13. Variación entre duplicados en matriz de suelo

Muestra	%RPD Plomo	%RPD Cadmio	%RPD Arsenico
MT1P1	16.14	11.78	16.62
MT2P1	130.20	20.30	2.586
MT3P1	76.12	73.99	23.82
MT1P2	2.80	136.80	72.28
MT2P2	39.81	82.96	5.697
MT3P2	68.19	99.14	16.55
MT1P3	161.8	5.77	65.35
MT2P3	21.14	99.02	5.971
MT3P3	49.98	150.40	134.20

*Nota. Se presenta la variación de lecturas de plomo, cadmio y arsénico (%RPD) entre los duplicados de las muestras de suelo, mediante el uso de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo %RPD en la sección de anexos, ecuación 1.*

Cuadro 14. Media de concentración de Pb, Cd y As en matriz de vegetación

Muestra	Plomo (ppb ± 0.24)	Cadmio (ppb ± 0.13)	Arsénico (ppb ± 11.40)
MV1P1	27.52	9.45	1454.30
MV2P1	43.68	23.90	2884.15
MV3P1	22.51	26.56	1981.17
MV1P2	29.64	21.19	819.21
MV2P2	15.30	8.98	657.84
MV3P2	31.66	6.01	1130.00
MV1P3	22.47	11.58	739.96
MV2P3	26.30	9.70	1065.74
MV3P3	25.72	19.47	670.67

*Nota. Se presentan las medias de las concentraciones reales encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de agua, mediante el uso de Voltamperometría de redisolución anódica, identificadas por: tipo de muestra, número de muestra y punto de muestreo.*

Cuadro 15. Variación entre duplicados en matriz de vegetación

Muestra	%RPD Plomo	%RPD Cadmio	%RPD Arsenico
MV1P1	6.07	19.58	59.09
MV2P1	26.26	51.52	105.1
MV3P1	10.42	49.23	124.6
MV1P2	57.80	N/A	44.09
MV2P2	N/A	N/A	N/A
MV3P2	36.06	129.4	N/A
MV1P3	3.721	63.68	31.49
MV2P3	28.81	95.09	29.53
MV3P3	21.91	29.43	N/A

*Nota. Se presenta la variación de lecturas de plomo, cadmio y arsénico (%RPD) entre los duplicados de las muestras de vegetación, mediante el uso de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo %RPD en la sección de anexos, ecuación 1.*

Cuadro 16. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz agua

Elemento	Media (ppb) (IC 95%)	Desviación Estándar (ppb)	Coefficiente de Variación (%)
Plomo	0.99 ±0.36	0.48	48.37
Cadmio	0.68±0.11	0.16	22.71
Arsénico	75.22 ±84.81	110.33	146.7

*Nota. Se presentan los resultados de la estadística descriptiva de las concentraciones encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de agua con intervalo de confianza al 95%. Ejemplo de cálculo de intervalo de confianza y coeficiente de variación en sección de anexos, ecuaciones 4 y 8.*

Cuadro 17. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz suelo

Elemento	Media (ppb) (IC 95%)	Desviación Estándar (ppb)	Coefficiente de Variación (%)
Plomo	67.56 ±46.02	59.86	88.60
Cadmio	14.84 ±3.55	4.55	30.69
Arsénico	421.78 ±46.66	60.71	14.39

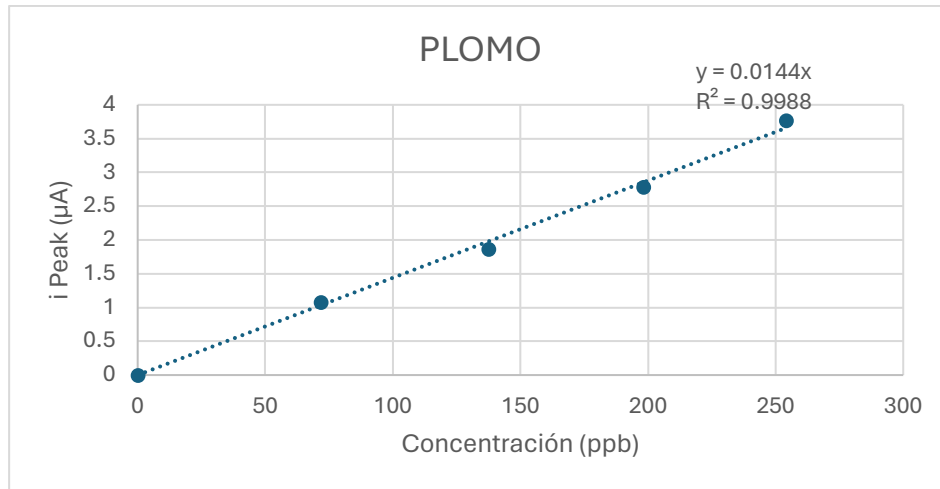
*Nota. Se presentan los resultados de la estadística descriptiva de las concentraciones encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de tierra con intervalo de confianza al 95%. Ejemplo de cálculo de intervalo de confianza y coeficiente de variación en sección de anexos, ecuaciones 4 y 8.*

Cuadro 18. Estadística descriptiva de las concentraciones de Pb, Cd y As encontradas en matriz vegetación

Elemento	Media (ppb) (IC 95%)	Desviación Estándar (ppb)	Coefficiente de Variación (%)
Plomo	27.19 ±5.99	7.80	28.67
Cadmio	15.20 ± 5.82	7.57	49.79
Arsénico	1267.00 ± 571.64	743.70	58.69

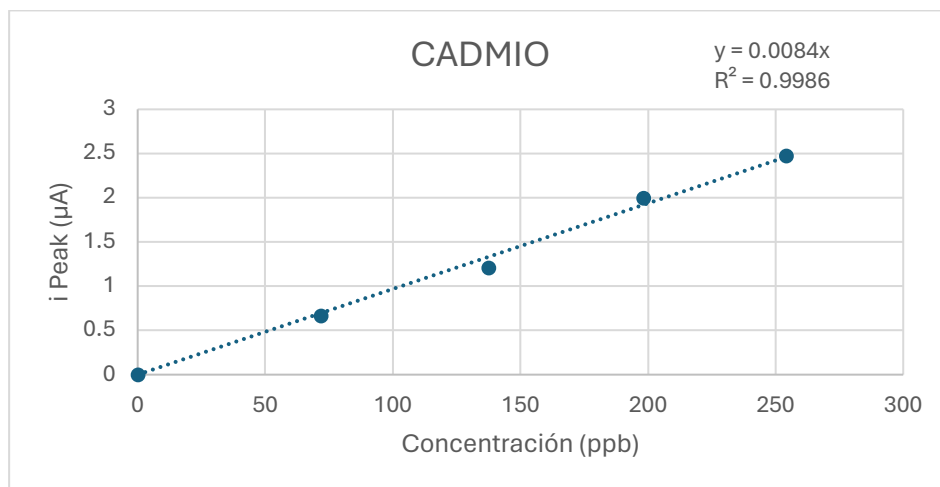
*Nota. Se presentan los resultados de la estadística descriptiva de las concentraciones encontradas de plomo, cadmio y arsénico en muestras de vegetación con intervalo de confianza al 95%. Ejemplo de cálculo de intervalo de confianza y coeficiente de variación en sección de anexos, ecuaciones 4 y 8.*

Figura 3. Curva de calibración Pb en matriz agua



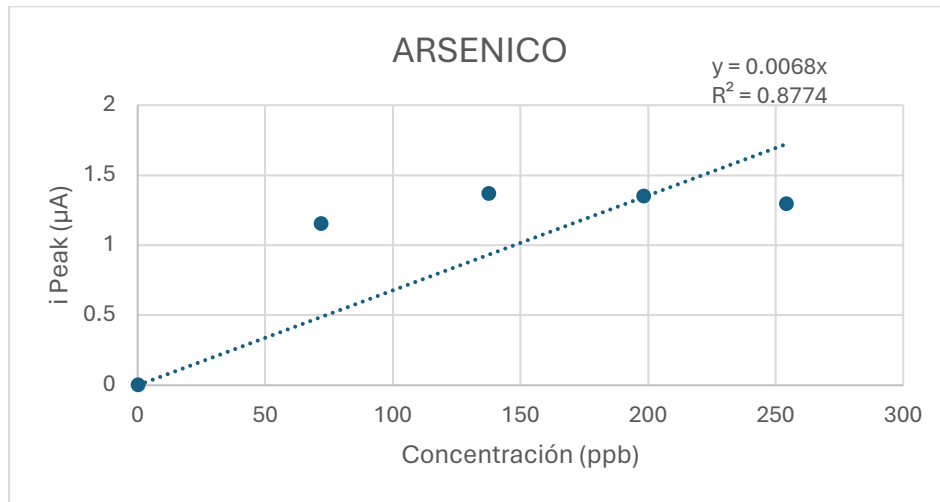
*Nota. Se presenta la curva de calibración de plomo en la matriz agua, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 4. Curva de calibración Cd en matriz agua



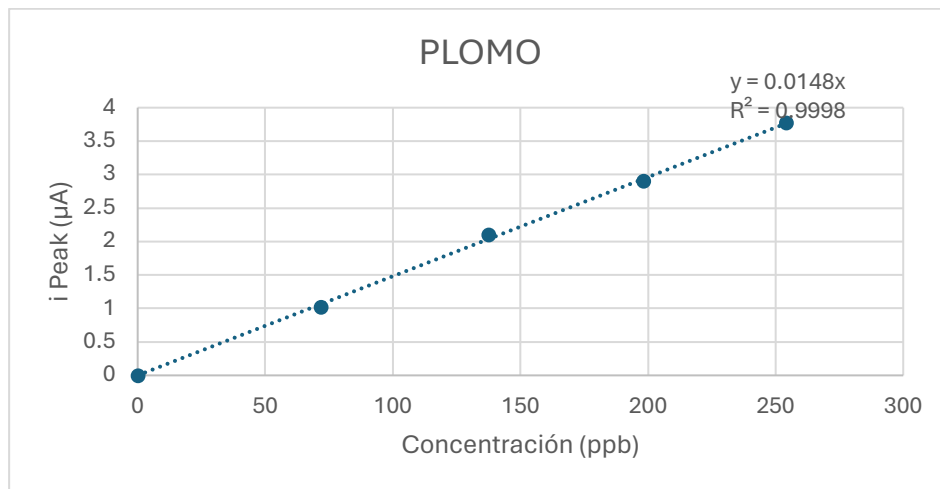
*Nota. Se presenta la curva de calibración de cadmio en la matriz agua, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 5. Curva de calibración As en matriz agua



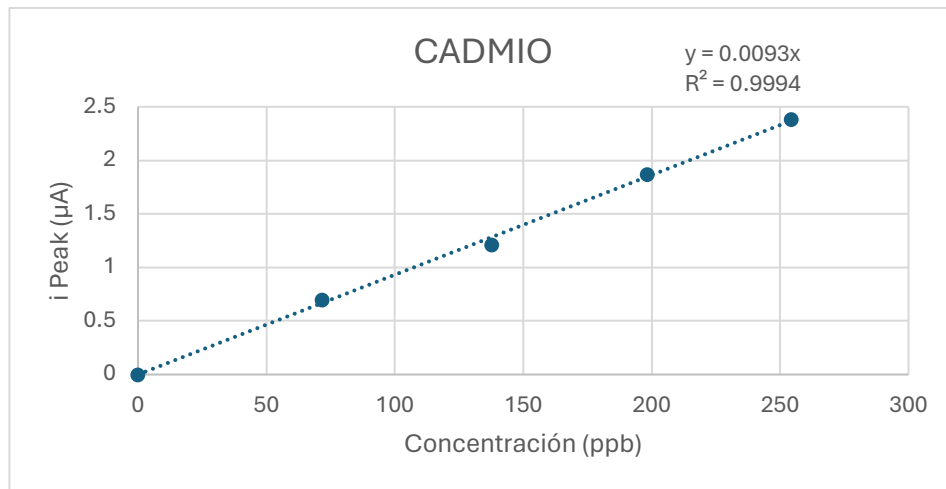
*Nota. Se presenta la curva de calibración de arsénico en la matriz agua, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 6. Curva de calibración Pb en matriz suelo



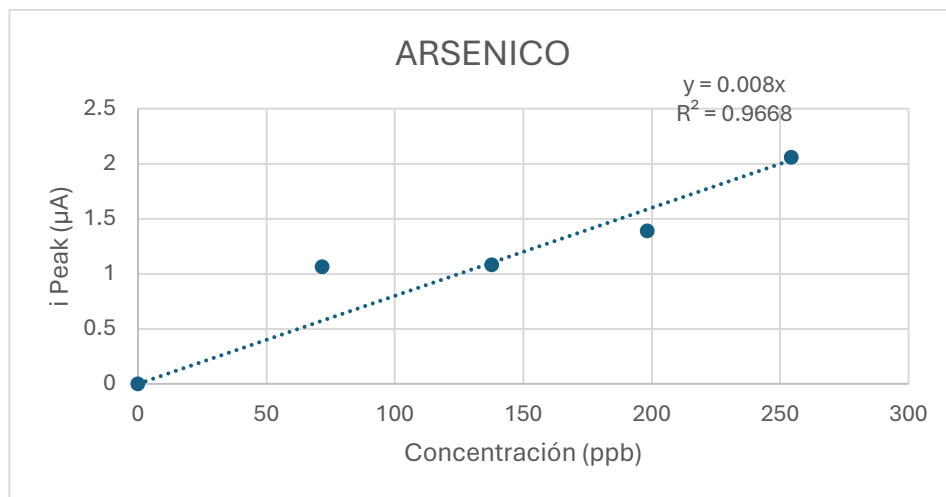
*Nota. Se presenta la curva de calibración de plomo en la matriz suelo, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 7. Curva de calibración Cd en matriz suelo



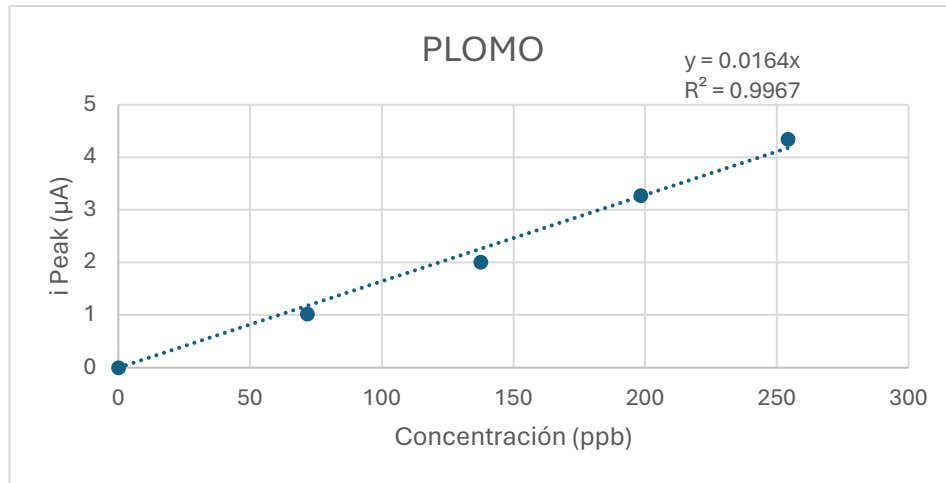
*Nota. Se presenta la curva de calibración de cadmio en la matriz suelo, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 8. Curva de calibración As en matriz suelo



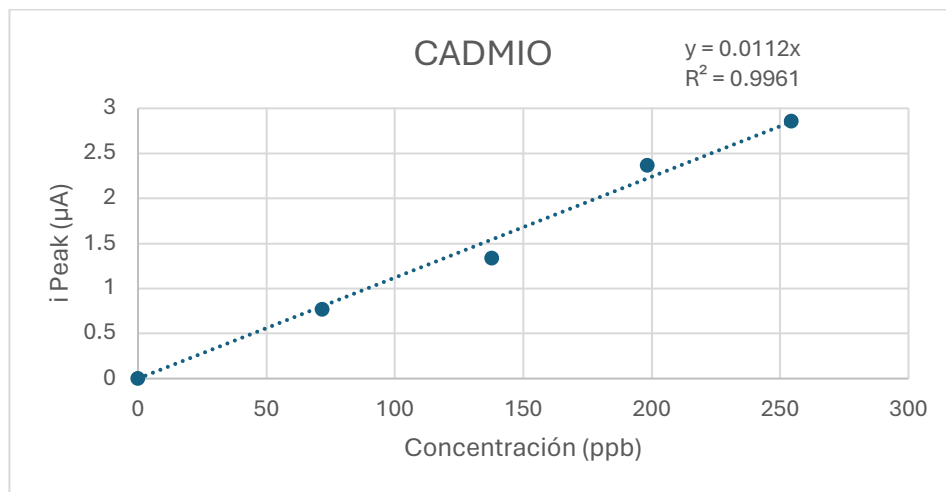
*Nota. Se presenta la curva de calibración de arsénico en la matriz suelo, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 9. Curva de calibración Pb en matriz vegetación



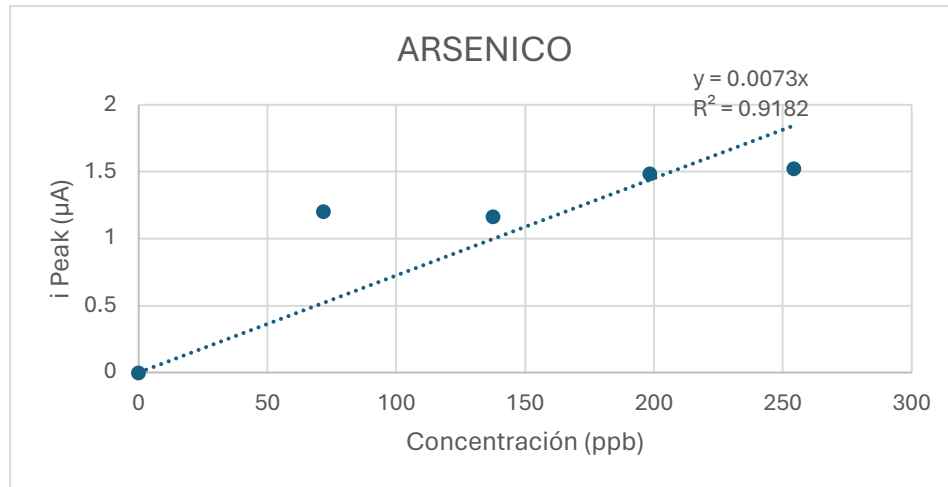
*Nota. Se presenta la curva de calibración de plomo en la matriz vegetación, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 10. Curva de calibración Cd en matriz vegetación



*Nota. Se presenta la curva de calibración de cadmio en la matriz vegetación, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Figura 11. Curva de calibración As en matriz vegetación



*Nota. Se presenta la curva de calibración de arsénico en la matriz vegetación, obtenida mediante el método de adición de estándar.*

Cuadro 19. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz agua

Elemento	Límite de detección (LOD ppb)	Límite de cuantificación (LOQ ppb)
Plomo	22.93	69.51
Cadmio	27.50	83.35
Arsénico	238.6	722.9

*Nota. Se presentan los límites de detección y cuantificación detectados para cada elemento, mediante el uso del método de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo de LOD y LOQ en sección de anexos, ecuaciones 5 y 6.*

Cuadro 20. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz suelo

Elemento	Límite de detección (LOD ppb)	Límite de cuantificación (LOQ ppb)
Plomo	12.02	36.42
Cadmio	16.05	48.65
Arsénico	118.6	359.43

*Nota. Se presentan los límites de detección y cuantificación detectados para cada elemento, mediante el uso del método de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo de LOD y LOQ en sección de anexos, ecuaciones 5 y 6.*

Cuadro 21. Límites de detección y cuantificación de Pb, Cd y As en matriz vegetación

Elemento	Límite de detección (LOD ppb)	Límite de cuantificación (LOQ ppb)
Plomo	32.14	97.39
Cadmio	39.89	120.9
Arsénico	188.6	571.7

*Nota. Se presentan los límites de detección y cuantificación detectados para cada elemento, mediante el uso del método de Voltamperometría de redisolución anódica. Ejemplo de cálculo de LOD y LOQ en sección de anexos, ecuaciones 5 y 6.*

Cuadro 22. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de agua contra normas COAGUANOR y OMS

Elemento	Media (mg/l)	COAGUANOR (mg/l)	OMS (mg/l)	Cumplimiento
Plomo	0.0009924	0.001	0.001	Si cumple
Cadmio	0.0007869	0.003	0.03	Si cumple
Arsénico	0.07697	0.01	0.01	No cumple

*Nota. Se presentan las medias de Pb, Cd y As obtenidos en muestras, comparándolos con las normas COAGUANOR y Organización Mundial de la Salud, determinando si las muestras sobrepasan los límites máximos permitidos para agua potable. Se realizó la conversión de los resultados de la media presentados en las estadísticas descriptivas de muestras de agua.*

Cuadro 23. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de suelo contra norma EPA

Elemento	Media (mg/kg)	Epa (mg/kg)	Cumplimiento
Plomo	8.45	420	Si cumple
Cadmio	1.85	85	Si cumple
Arsénico	52.72	75	Si cumple

*Nota. Se presentan las medias de Pb, Cd y As obtenidos en muestras, comparándolos con la norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, determinando si las muestras sobrepasan los límites máximos permitidos para lodos/suelo. Se realizó la conversión de los valores de media presentados en las estadísticas descriptivas de muestras de suelo, tomando en cuenta la cantidad de muestra analizada.*

Cuadro 24. Comparación de promedio de Pb, Cd y As encontrado en muestras de vegetación contra norma CXS 193-1995

Elemento	Media (mg/kg)	CXS 193-1995 (mg/kg)	Cumplimiento
Plomo	1.36	0.3	No cumple
Cadmio	0.76	0.2	No cumple
Arsénico	63.35	0.2	No cumple

*Nota. Se presentan las medias de Pb, Cd y As obtenidos en muestras, comparándolos con la norma de Codex Alimentarius, determinando si las muestras sobrepasan los límites máximos permitidos para vegetación. Se realizó la conversión de los valores de media presentados en las estadísticas descriptivas de muestras de vegetación, tomando en cuenta la cantidad de muestra analizada.*

Cuadro 25. Comparación de muestras de suelo contaminadas de Pb contra norma EPA

Muestra	Concentración de plomo (mg/kg)	Límite plomo según norma EPA	Cumplimiento
MT2P1	7.14	420	Si cumple
MT3P1	5.30	420	Si cumple
MT3P2	5.46	420	Si cumple
MT1P3	15.98	420	Si cumple
MT2P3	24.93	420	Si cumple
MT3P3	8.76	420	Si cumple

*Nota. Se presentan las medias cuantificables de Pb obtenidos en muestras, comparándolos con la norma de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, determinando si las muestras sobrepasan los límites máximos permitidos para lodos/suelo. Se realizó la conversión de los valores de media presentados en las estadísticas descriptivas de muestras de suelo, tomando en cuenta la cantidad de muestra analizada.*

## IX. DISCUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar la presencia de plomo, cadmio y arsénico en agua, suelo y vegetación de la microcuenca del río Contreras, mediante la técnica de voltamperometría de tiras o de redisolución. Esto debido a la importancia de mantener un monitoreo y control sobre la presencia de estos contaminantes en el ambiente, ya que representan un peligro para la salud humana y ambiental.

En el caso del plomo, únicamente 6 de las 27 muestras analizadas en total presentaron concentraciones cuantificables y detectables, siendo estas MT2P1, MT3P1, MT3P2, MT1P3, MT2P3 y MT3P3 como se observa en el cuadro 8. El plomo en la matriz de suelo presentó una media de  $67.56 \pm 51.93$  ppb, con una desviación de 59.86 ppb con respecto a la media, indicando una gran dispersión de los datos y un elevado coeficiente de variación del 88.60%, indicando una variabilidad alta entre las muestras como se puede evidenciar en el Cuadro 17.

Respecto al analito de cadmio, los resultados obtenidos en las tres matrices analizadas de agua, suelo y vegetación, fueron concentraciones por debajo del límite de cuantificación en sus matrices correspondientes, por lo que no puede asegurar con confiabilidad la presencia de cadmio en las distintas muestras.

El arsénico fue detectado en grandes cantidades en todas las muestras analizadas, sin embargo, existen limitaciones importantes para su confiabilidad. Las curvas de calibración realizadas para la determinación del límite de detección y límite de cuantificación para el arsénico en las diversas matrices investigadas no presentan linealidad, además de contar con un  $R^2 < 0.98$  cómo puede visualizarse en las Figuras 7, 10 y 13. Este mismo fenómeno se repitió al momento de la construcción de la curva de calibración sobre la muestra, siguiendo el método de adición de estándares aplicado en este trabajo, como se evidencia en las Figuras 15, 17 y 19 en la sección de anexos. Teniendo en cuenta este comportamiento irregular donde el incremento de la concentración de analito no es proporcional a la señal obtenida, no es posible asegurar con precisión y exactitud la cuantificación del analito arsénico.

En este estudio se trabajó utilizando la técnica de adición de estándares para la cuantificación de los analitos y la realización de las curvas de calibración en todas las matrices (agua, suelo y vegetación). Este método de adición permite corregir posibles efectos de matriz, especialmente en matrices complejas. Sin embargo, el potencial daño del electrodo ItalSens IS-HM durante su transporte y posible exposición a rayos X, se presentó una sensibilidad reducida, observables en las pendientes de las curvas, junto con una desviación elevada, aunque presentan una buena linealidad y un  $R^2 > 0.98$ , como puede observarse en las Figuras 3, 4, 6, 7,9 y 10 . Esto resulta en LOQ y LOD más elevados, presentados en los Cuadros 19, 20 y 21 (Amaya, Carvajal, Gómez, & Mendoza, 2023). También existe la limitación del método, pues este está enfocado y diseñado para muestras de agua y la evaluación de plomo, cadmio y cobre en específico, limitando su capacidad para la detección de otros analitos como el arsénico y su capacidad para analizar matrices complejas como el suelo y la vegetación.

Todas las muestras de cada matriz correspondiente fueron analizadas en duplicado. Para analizar la precisión se calculó la variación entre duplicados, obteniendo la diferencia porcentual relativa (% RPD) presentados en los Cuadros 11, 13 y 15. Con este porcentaje se busca identificar si el equipo está reportando lecturas iguales, cercanas o si hay una gran

discordancia entre lecturas. Se toma como un %RPD aceptable >20%, tolerando un >30% para matrices complejas (suelo y vegetación) (EPA, sf)(EPA, 2007).

Con propósitos comparativos, se tomaron los promedios de plomo, cadmio y arsénico de las matrices agua, suelo y vegetación y se contrastaron con los límites máximos establecidos por diferentes normas internacionales y nacionales. En la matriz agua, los niveles promedio de plomo y cadmio se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la norma COAGUANOR, mientras el arsénico aparentemente sobrepasa estos límites como se observa en el Cuadro 16. En el Cuadro 17 presenta el promedio de los metales con respecto a los límites establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en el suelo, donde ninguno de los analitos estudiados rebasan el límite. Mientras en el Cuadro 18, se presenta los promedios de los contaminantes con respecto a la norma del CODEX Alimentarius CXS 193-1995, donde los tres metales estudiados sobrepasan los límites. Cabe resaltar que la norma CXS 193-1995 establece límites de contaminantes únicamente para vegetales y alimentos destinados al consumo humano, pues no hay una norma que regule metales pesados en plantas silvestres. Además, que no puede asegurarse que el arsénico en agua, suelo y vegetación analizada cumpla o no con las normas mencionadas, ya que los valores obtenidos no fueron concentraciones cuantificables. Este análisis es útil para tener una perspectiva general sobre la presencia de los contaminantes en las distintas matrices estudiadas.

Es de importancia recalcar que no todas las muestras presentaron metales pesados en proporciones cuantificables, por lo que, se tomaron los valores de plomo encontrados en suelo que sobrepasaran el límite de cuantificación (LOQ) y se compararon con el límite máximo permitido de plomo determinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en el suelo. Dentro de ellos se observa en el Cuadro 19 que ninguna de las muestras sobrepasan el máximo permisible.

Los analitos de interés en las matrices de agua y suelo no presentan una contaminación importante o alarmante de metales pesados. Sin embargo, es de importancia

recordar la capacidad de bioacumulación de estos contaminantes, sugiriendo que con el tiempo, esta concentración encontrada pueda aumentar. Identificar la fuente de contaminación puede ayudar a crear planes de contención que evite el aumento de la presencia de estos componentes, ayudando a la preservación de la microcuenca del río Contreras y, por ende, menos exposición en actividades humanas que utilicen este cuerpo de agua y su propagación hacia otros cuerpos hídricos. Especialmente en estas masas de agua que se encuentran en zonas urbanas, aumentando la posible exposición a sustancias tóxicas. Mantener un monitoreo constante es de interés para tener un control sobre los niveles de contaminación por plomo, cadmio y arsénico.

Este trabajo permitió evaluar la presencia de plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As) en agua, suelo y vegetación mediante la voltamperometría de tiras o de redisolución, evidenciando limitaciones con algunos analitos. Sin embargo, fue posible identificar focos de contaminación en vegetación si en dado caso existieran plantas comestibles en la microcuenca. Se evidenció que el uso de la voltamperometría es una herramienta útil para el monitoreo y evaluación de analitos como el plomo y el cadmio.

## X. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos, se observa la capacidad del equipo en identificar los analitos de interés, pues estos presentaron sus picos característicos. Únicamente los analitos plomo y cadmio presentaron linealidad y un coeficiente de determinación  $>0.98$  en las curvas de calibración, al igual que en las lecturas de las muestras utilizando la técnica de adición de estándares. Mientras, el analito arsénico no presentó un comportamiento lineal ni coeficientes de determinación aceptables en ninguna de las matrices, impidiendo que este se pueda considerar confiable e identificando una limitación del equipo para la detección de este analito. Sin embargo, el desempeño analítico se vio limitado por una sensibilidad reducida y un error elevado, por consecuencia de un electrodo posiblemente dañado afectando directamente los límites de detección y cuantificación.

Se encontraron concentraciones de plomo cuantificables en las muestras de suelo MT2P1, MT3P1, MT3P2, MT1P3, MT2P3 y MT3P3; donde ninguno de los mencionados superaron los límites máximos permitidos de plomo según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para suelos. Se encontró que las muestras de vegetación superan los límites para los tres analitos analizados según la norma CXS 193-1995, sin embargo, es de importancia recalcar que esta norma está enfocada en contaminantes en vegetación de consumo humano, no vegetación silvestre. Aunque se obtuvieron concentraciones de cadmio y plomo presentes en el resto de las muestras, estas se encontraban por debajo del límite de cuantificación en todas las matrices, por lo que, no es un resultado preciso.

Finalmente, las estadísticas descriptivas y los valores de % RPD nos indican que existe una gran dispersión y varianza entre las muestras, así como entre las lecturas individuales de los duplicados. Afectando de este modo la precisión y la reproducibilidad.

## XI. RECOMENDACIONES

Como recomendaciones, se sugiere reforzar el manejo y transporte de los electrodos, teniendo en cuenta la sensibilidad de estos. Además, se recomienda analizar las muestras en paralelo con otro equipo para asegurar la correcta lectura de las mismas. La validación del método es esencial para asegurar un correcto desempeño, evaluando criterios como especificidad, linealidad, robustez, exactitud, repetibilidad y reproducibilidad. Finalmente, se recomienda evaluar una técnica distinta para la digestión de muestras de suelo y vegetación, donde no se requiera el uso de ácido nítrico, para evitar la degradación del electrodo.

## XII. REFERENCIAS

- Achara, S. (2018). Collection and preparation of soil, water and plant samples for analysis. *International Journal of Chemical Studies*, 3298–3303.
- Amaya, Á., Carvajal, A., Gómez, R., & Mendoza, Y. (2023). Demostración práctica de la importancia de la longitud de onda en la espectroscopía Ultravioleta Visible. Obtenido de Educación Química: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-893X2023000200040](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2023000200040)
- Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (2008). *Estadística para administración y economía*. México: Cengage Learning.
- ASTDR. (2007). Resumen de Salud Pública Arsénico. Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs2.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.pdf)
- ATSDR. (1999). Resumen de Salud Pública Cadmio . Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs5.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.pdf)
- Barrera, P. (2024). Microcuenca Pedagógica del río Contreras: Ejemplo de un proyecto multidisciplinario. Obtenido de Universidad del Valle de Guatemala: <https://noticias.uvg.edu.gt/microcuenca-pedagogica-del-rio-contreras-ejemplo-de-un-proyecto-multidisciplinario/>

CODEX Alimentarius. (2023). NORMA GENERAL PARA LOS CONTAMINANTES Y LAS TOXINAS PRESENTES EN LOS ALIMENTOS Y PIENSOS. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-COPRESAM>. (sf). Norma técnica Guatemalteca. COGUANOR NTG 29001. Obtenido de Comisión Presidencial de Asuntos Municipales: <https://www.copresam.gob.gt/wp-content/uploads/2021/01/Norma-Tecnica-Guatemalteca-NTG29001.pdf>

CSA. (2023). Metales pesados en alimentos. Obtenido de CSA Seguridad Alimentaria: <https://csaconsultores.com/metales-pesados-y-alimentos/#:~:text=Los%20metales%20pesados%20como%20el,entrar%20en%20la%20cadena%20alimentaria>.

Daniel Benítez, e. a. (2021). Método voltamperométrico para el análisis de cadmio en aguas residuales. Revista Cubana de Química. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v33n3/2224-5421-ind-33-03-415.pdf>

DESI. (2018). Manual collection of surface water samples (including field filtration). Obtenido de Department of Environment and Science Queensland : [https://environment.des.qld.gov.au/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0032/90788/physical-and-chemical-assessment-manual-collection-of-surface-water-samples-including-field-filtration.pdf](https://environment.des.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0032/90788/physical-and-chemical-assessment-manual-collection-of-surface-water-samples-including-field-filtration.pdf)

Dolan. (2025). Chromatographic Measurements, Part 5: Determining LOD and LOQ Based on the Calibration Curve. Obtenido de Separation Science: <https://www.sepscience.com/hplc-solutions-126-chromatographic-measurements-part-5-determining-lod-and-loq-based-on-the-calibration-curve-6959>

Ejaz et al. (2023). Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. Obtenido de Frontiers in Plant Science: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1154571/full>

EPA. (1994). Method 200.8 DETERMINATION OF TRACE ELEMENTS IN WATERS AND WASTES BY INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETR. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/epa-200.8.pdf>

EPA. (2000). Heavy Metals in Soil Contaminantion. Obtenido de United States Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Services: <https://semspub.epa.gov/work/03/2227185.pdf>

EPA. (2007). *Appendix I-B 2007 Laboratory Data* . Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/module1\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/module1_0.pdf)

EPA. (2007). METHOD 3051A MICROWAVE ASSISTED ACID DIGESTION OF SEDIMENTS, SLUDGES, SOILS, AND OILS. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>

EPA. (sf). Module 1. Guidance on Preparing a QA Project Plan . Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/module1\\_0.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/module1_0.pdf)

Flores, R. e. (2019). Guía de Bioseguridad para Laboratorios Clínicos. Obtenido de Instituto de salud Pública de Chile: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/GU%C3%8DA%20DE%20BIOSEGURIDAD%20PARA%20LABORATORIOS%20CL%C3%8DNICOS.pdf>

FUNCAGUA. (2022). Informe del Estado del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala . Obtenido de Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala. : <https://funcagua.org.gt/wp-content/uploads/2022/03/Informe-del-agua-2022-version-digital.pdf>

FUNCAGUA. (2024). Agua en Guatemala. Obtenido de Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala: <https://funcagua.org.gt/agua-en-guatemala/#:~:text=Dentro%20de%20nuestro%20territorio%20tenemos,M%C3%A9xico%20y%2010%20al%20Atl%C3%A1ntico.>

FUNCAGUA. (2024). Contaminación. Obtenido de Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala: <https://funcagua.org.gt/contaminacion/>

FUNCAGUA. (2024). PROYECTO MICROCUENCA PEDAGÓGICA DEL RÍO CONTRERAS. Obtenido de Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala: <https://funcagua.org.gt/proyecto-microcuenca-pedagogica-del-rio-contreras/>

Galán , E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Obtenido de Universidad de Sevilla: [https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10\\_48.pdf](https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10_48.pdf)

Galindo, H. (2018). DOCUMENTO SOBRE LA SITUACIÓN Y RETOS DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN GUATEMALA. Obtenido de Red de Agua Potable y Saneamiento de Guatemala: [https://rasgua.org/es/wp-content/uploads/2024/01/3-2018\\_ago\\_29-diagnostico-aps.pdf](https://rasgua.org/es/wp-content/uploads/2024/01/3-2018_ago_29-diagnostico-aps.pdf)

Lodoño, L., Lodoño, P., & Muñoz, F. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. Obtenido de Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>

Mancilla-Villa, O. R.-V.-G.-G.-E.-C. (2023). Metales pesados en agua y macroinvertebrados de la cuenca del río Ayuquila-Armería (México) y sus afluentes Obtenido de Universidad de Guadalajara: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v41/2395-8030-tl-41-e1603.pdf>

MARN. (2023). Informe Ambiental del Estado de Guatemala. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales: [https://www.marn.gob.gt/wpfd\\_file/informe-ambiental-del-estado-de-guatemala/](https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/informe-ambiental-del-estado-de-guatemala/)

MARN. (sf). Reglamento Aguas Residuales.5.06. Obtenido de Ministerio de Ambiente y recursos Naturales: <https://www.ecosistemas.com.gt/wp-content/uploads/2016/04/07-Acuerdo-Gubernativo-236-2006.pdf>

Méndez, J., González, C., Román, A., & Prieto, F. (2009). CONTAMINACIÓN Y FITOTOXICIDAD EN PLANTAS POR METALES PESADOS PROVENIENTES DE SUELOS Y AGUA . Obtenido de Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. : <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Milestone. (2018). Leaves: Milestone Application Note for Acid Digestion SK-Environmental-014. Obtenido de Milestone: <https://www.analytix.co.uk/wp-content/uploads/2018/05/SK-Environmental-014-Leaves.pdf>

MSPAS. (2006). Reglamento Para el Manejo de Desechos Sólidos Hospitalarios. Acuerdo Gubernativo No. 509-20006. Obtenido de Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social:

[https://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Guatemala/GT\\_Acuerdo\\_Desechos\\_509\\_2001.pdf](https://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Guatemala/GT_Acuerdo_Desechos_509_2001.pdf)

Olmos, D., & Olmos, D. (2022). Efectos sobre la salud por agua contaminada con metales pesados. Obtenido de Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/issue/archive>

OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda . Obtenido de Organización Mundial de la Salud : <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf>

OPS. (sf). PLOMO. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.paho.org/es/temas/plomo#:~:text=El%20plomo%20es%20un%20metal,%2C%20del%20aparato%20digestivo%2C%20renales>

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Obtenido de Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 14, no. 27: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>

PalmSens. (2016). Teacher's Guide to the PalmSens Educational Kit . Obtenido de PalmSens BV: [https://www.basinc.com/assets/file\\_uploads/PalmSens%20Sample%20EduKit%20Teacher's%20Guide.pdf](https://www.basinc.com/assets/file_uploads/PalmSens%20Sample%20EduKit%20Teacher's%20Guide.pdf)

PalmSens. (2022). PSAN-IS-HM Heavy Metal Detection in River Water. Obtenido de PalmSens: <https://assets.palmsens.com/app/uploads/2021/05/PSAN-IS-HM-Heavy-Metal-Detection-in-River-Water-2022-11-01.pdf>

PalmSens. (sf). IS-HM Description. Obtenido de PalmSens: <https://assets.palmsens.com/app/uploads/2022/11/ItalSens-IS-HM-description.pdf>

PNUMA. (sf). CONVENIO DE BASILEA SOBRE EL CONTROL DE LOS MOVIMIENTOS TRANSFRONTERIZOS DE LOS DESECHOS PELIGROSOS Y SU ELIMINACIÓN . Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: <https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-s.pdf>  
[proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS\\_193s.pdf](https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconventiontext-s.pdf)

PRTR. (sf). Cd (Cadmio y compuestos). Obtenido de Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes de España: <https://prtr-es.es/Cd-Cadmio-y-compuestos,15605,11,2007.html>

Romero, H., Vera, T., Redrovan, F., Jumbo, J., & Pesantez, F. (2019). APLICACIÓN DE VOLTAMPEROMETRÍA DE REDISOLUCIÓN ANÓDICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ANTIMONIO. Obtenido de Rev Soc Quím Perú. 85(3) : <http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v85n3/a02v85n3.pdf>

Rosas Rodríguez, H. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Obtenido de Universidad Politécnica de Cataluña : <https://www.tesisenred.net/handle/10803/6978?show=full>

S. E. Pabón, R. B.-V. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. Obtenido de Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 14, no. 27: <http://www.scielo.org.co/pdf/ecei/v14n27/1909-8367-ecei-14-27-9.pdf>

SEGEPLAN. (sf). POLÍTICA NACIONAL DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO. Obtenido de Gobierno de Guatemala: [https://www.segeplan.gob.gt/downloads/clearinghouse/politicas\\_publicas/Salud/Politica\\_Nacional\\_del\\_Sector\\_de\\_Agua\\_Potable\\_y\\_Saneamient.pdf](https://www.segeplan.gob.gt/downloads/clearinghouse/politicas_publicas/Salud/Politica_Nacional_del_Sector_de_Agua_Potable_y_Saneamient.pdf)

Skoog. (2015). Fundamentos de química analítica. México, D.F: Cengage Learning Editores, S.A.

SUIC. (2020). Procedimiento normalizado de trabajo: Limpieza de material de vidrio. Obtenido de Universidad de Murcia: Servicio Universitario de Instrumentación Científica: [https://www.um.es/documents/1765772/26237061/PNT-SUIC-2020-8\\_Limpieza+material+de+vidrio.pdf/dc103674-ee3e-4664-9ca0-46afb62f223e?t=1631805323034](https://www.um.es/documents/1765772/26237061/PNT-SUIC-2020-8_Limpieza+material+de+vidrio.pdf/dc103674-ee3e-4664-9ca0-46afb62f223e?t=1631805323034)

Tafur, J. (2016). Método voltamperométrico para el análisis de cadmio en aguas residuales. Obtenido de Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16442/1/CD-7153.pdf>

UBU. (2022). Espectrometría de Masas de Plasma (ICP-MS). Obtenido de Universidad de Burgos: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/espectrometria/espectrometria-de-masas-de-plasma-icp-ms>

### XIII. ANEXOS

Figura 12. Voltammograma MA1P1 lectura 1

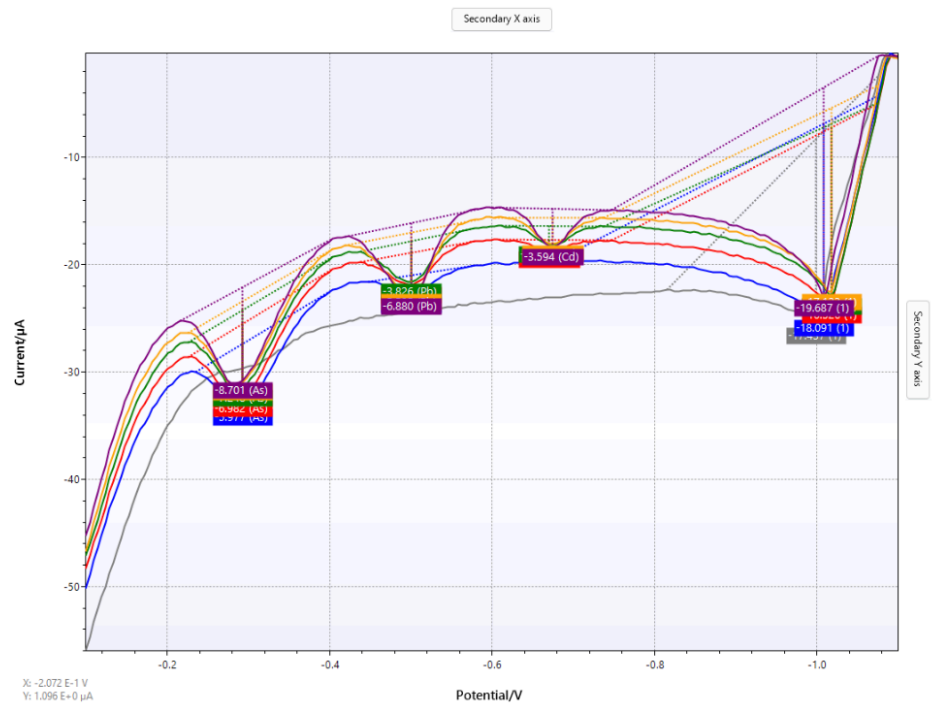


Figura 13. Resultados MA1P1 lectura 1 obtenidos en el Software PSTrace

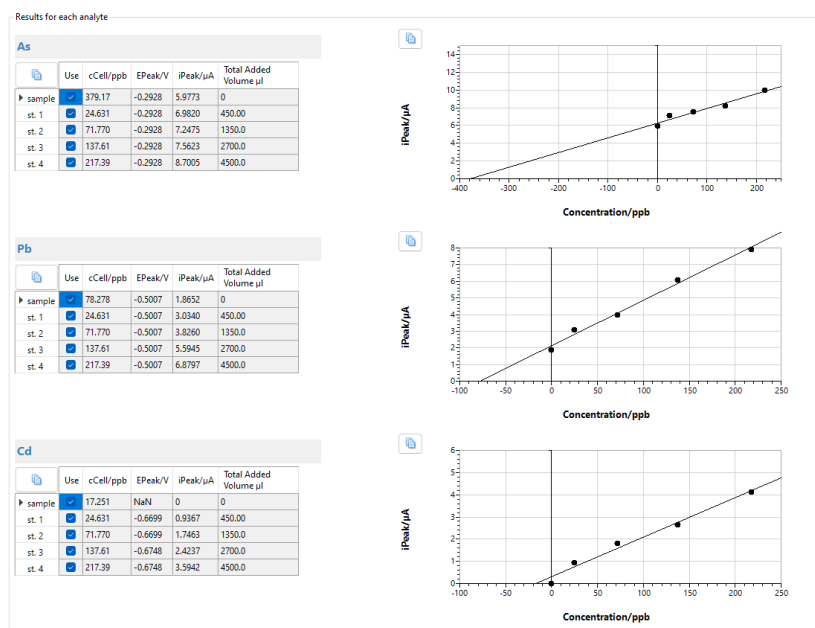


Figura 14. Voltammograma MT3P1 lectura 1

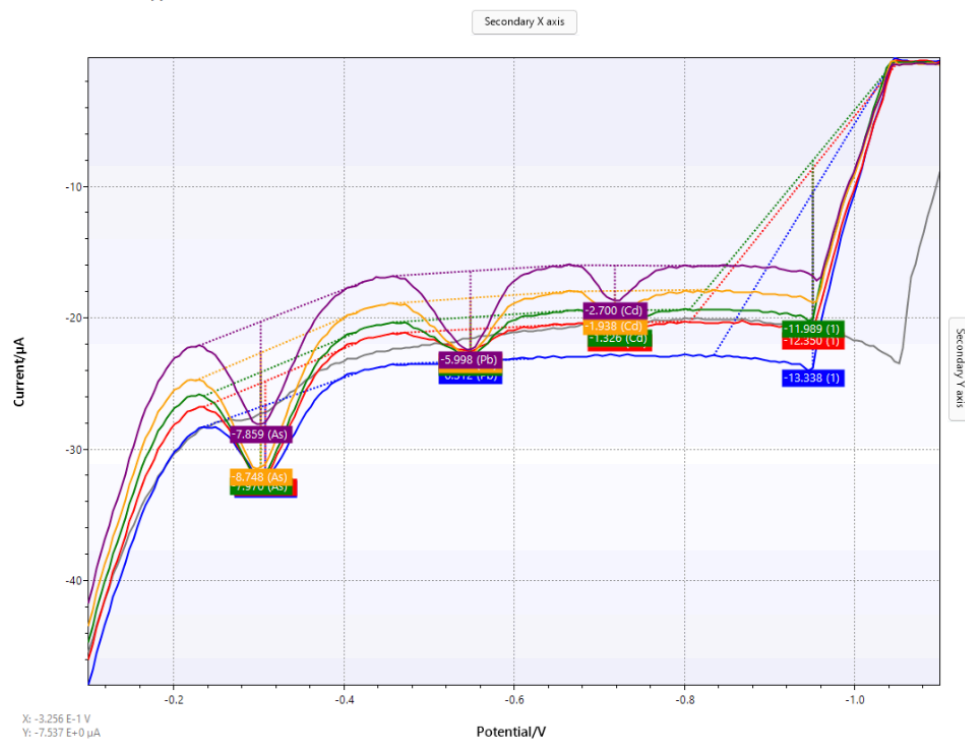


Figura 15. Resultados MT3P1 lectura 1 obtenidos en el software PStTrace

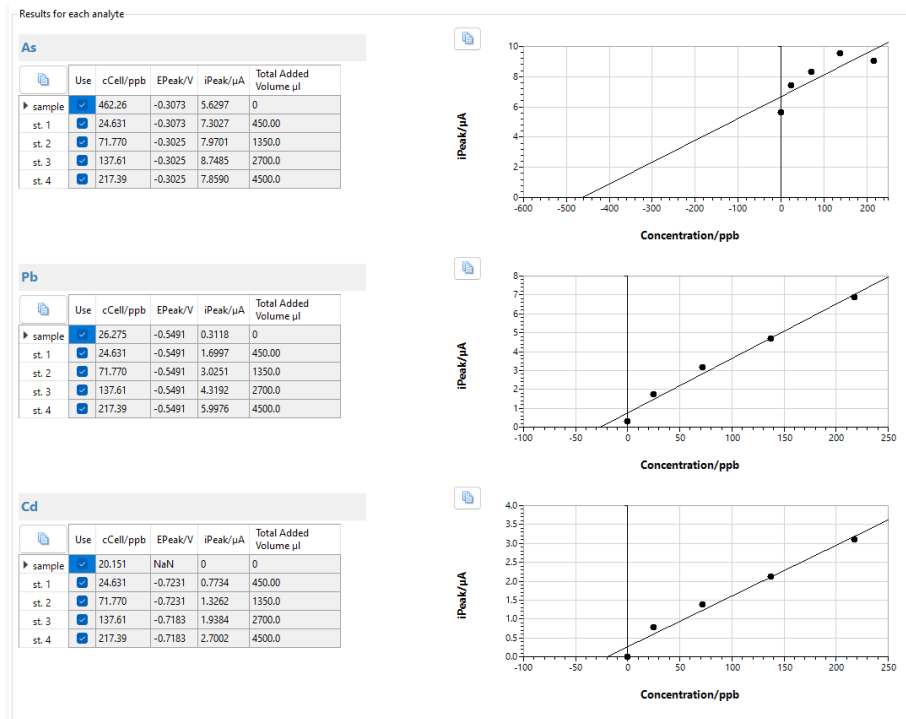


Figura 16. Voltammograma MV2P1 lectura 2

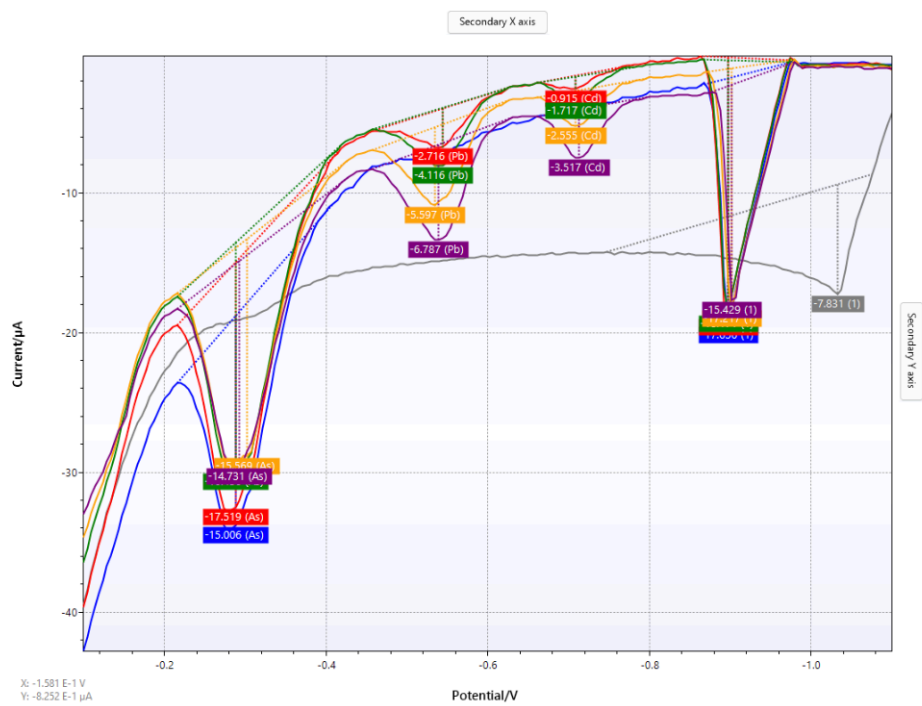


Figura 17. Resultados MV2P1 lectura 2 obtenidos en el software PStTrace

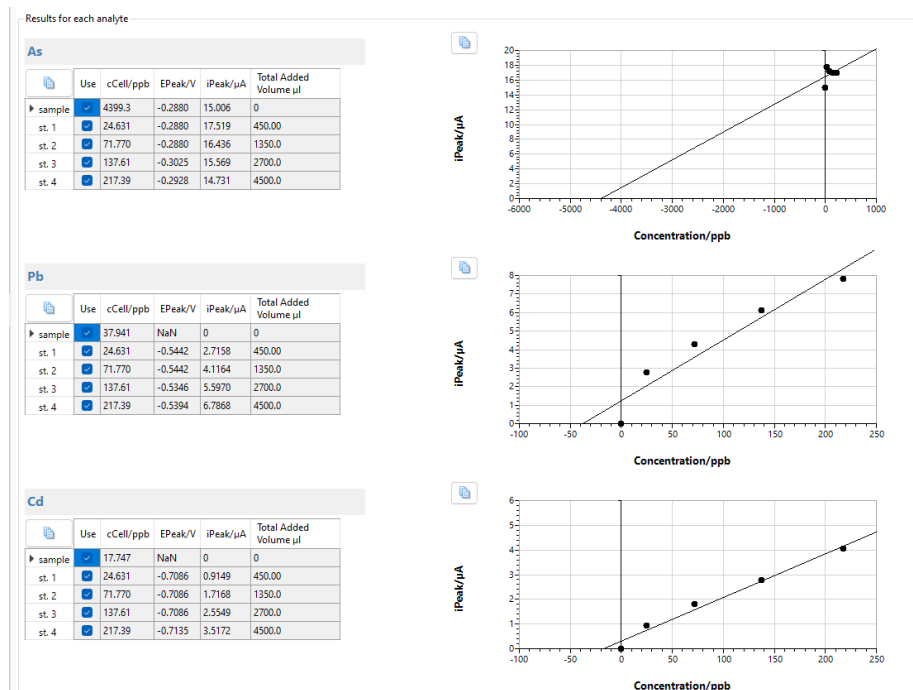


Figura 18. Equipo de voltamperometría SensitSmart



Figura 19. Electrodo *ItalSens IS-HM*

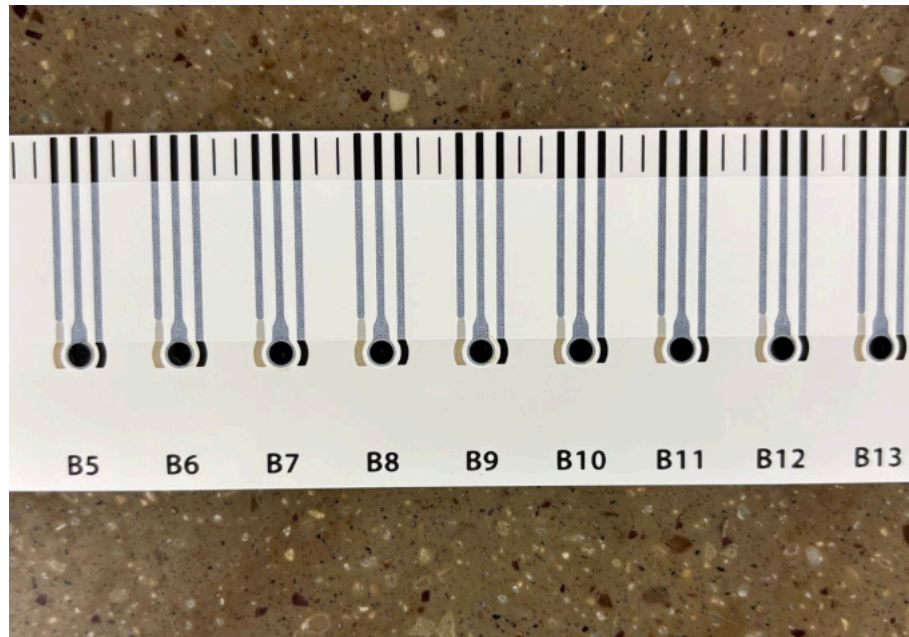


Figura 20. Horno Froilabo Air Expert.



Figura 21. Equipo de digestión ETHOS UP



Figura 22. Muestra de vegetación pulverizada, previa a digestión.



Figura 23: Muestras de vegetación antes de digestión



Figura 24. Muestras de vegetación digeridas

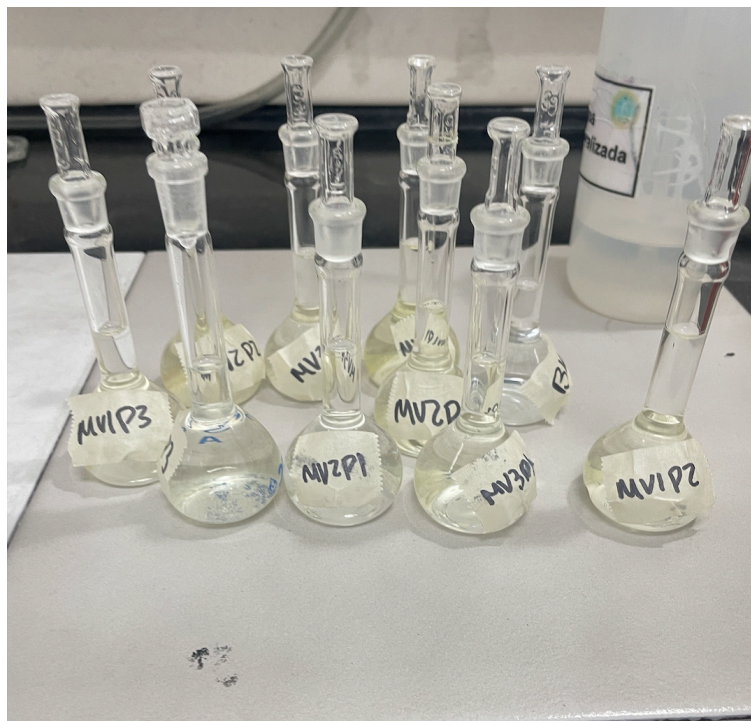


Figura 25. Punto de muestreo en microcuena



Ecuación 1. Diferencia Porcentual Relativa

$$\%RPD = \frac{|X_1 + X_2|}{(X_1 + X_2)/2} * 100$$

Donde:

$X_1$  = Lectura 1.

$X_2$  = Lectura 2.

Ejemplo de cálculo

$$\%RPD = \frac{|15.16 + 19.38|}{(15.16 + 19.38)/2} * 100 = 24.41\%$$

Este cálculo se aplica para todos los %RPD de las diferentes muestras y sus respectivas matrices. Tomando los valores correspondientes de  $X_1$  y  $X_2$  de cada muestra.

Ecuación 2. Media

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2}{n}$$

Donde:

$X_1$  = Lectura 1.

$X_2$  = Lectura 2.

$n$  = Número de muestras.

Ecuación 3. Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$X_i$  = Cada valor de lectura.

$\bar{X}$  = Media.

$n$  = Número de muestras.

Ecuación 4. Coeficiente de variación

$$\%CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

$S$  = Desviación estándar.

$\bar{X}$  = Media.

Ejemplo de cálculo:

$$\%CV = \frac{0.48}{0.99} * 100 = 48.37$$

Cálculo realizado para el coeficiente de variación de plomo en matriz agua. Este cálculo se utilizó para todos los coeficientes de variación de las diferentes matrices y analitos, presentados en los cuadros de estadística descriptiva.

Ecuación 5. Límite de detección

$$LOD = \frac{3.3 * \sigma}{m}$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

m = Pendiente de la curva.

Ejemplo de cálculo:

$$LOD = \frac{3.3 * 0.101}{0.014} = 22.93$$

Cálculo realizado para límite de detección de plomo en matriz agua. Este fue aplicado para el resto de cálculos de límite de detección, utilizando el valor correspondiente de la desviación y pendiente de cada curva de calibración.

Ecuación 6. Límite de cuantificación

$$LOQ = \frac{10 * \sigma}{m}$$

Donde:

$\sigma$  = Desviación estándar.

m = Pendiente de la curva.

Ejemplo de cálculo:

$$LOQ = \frac{10 * 0.101}{0.014} = 69.51$$

Cálculo realizado para límite de cuantificación de plomo en matriz agua. Este fue aplicado para el resto de cálculos de límite de detección, utilizando el valor correspondiente de la desviación y pendiente de cada curva de calibración.

Ecuación 7. Concentración real muestras de agua

$$C_1 = \frac{C_2 * V_2}{V_1}$$

Donde:

$C_2$  = Concentración indicada en la lectura.

$V_2$  = Volumen final (10ml).

$V_1$  = Volumen inicial (250ml).

Ejemplo de cálculo:

$$C_1 = \frac{379.17 \text{ ppb} \pm 0.005 * 10\text{ml} \pm 0.02\text{ml}}{250\text{ml} \pm 5\%} = 15.17\text{ppb} \pm 0.05\text{ppb}$$

Cálculo correspondiente a la concentración real de la lectura 1 de la muestra MA1P1 para arsénico en matriz agua. Debido a que las muestras de agua fueron concentradas, es necesario calcular la concentración real de las muestras. Este fue aplicado para todas las lecturas de las muestras de agua, utilizando el valor correspondiente de  $C_2$  para cada muestra.

Ecuación 8. Intervalo de confianza 95%

$$IC_{95\%} = \bar{X} \pm Z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$\bar{X}$  = Media.

$Z_{\alpha/2}$  = Valor de distribución t.

$S$  = Desviación estándar.

$n$  = Número de muestras.

Ejemplo de cálculo:

$$IC_{95\%} = 0.99 \pm 2.306 \frac{0.48}{\sqrt{9}} = 0.99 \pm 0.36$$

Este cálculo corresponde al intervalo de confianza de la media de plomo en la matriz agua. Se aplica al resto de intervalos de confianza, con sus respectivas desviaciones y medias. Estos se encuentran presentados junto a la media en los cuadros de estadística descriptiva.