

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS CADMIO,  
NÍQUEL, PLOMO Y ZINC EN LA ZONA DE INFLUENCIA  
DEL RELLENO SANITARIO DE SONSONATE, EL  
SALVADOR.**

PRESENTADO POR:

**LUISA MARÍA MENDOZA MAGAÑA**

**JAIME RODRIGO RIVAS**

**KATHYA LIZZETTE VILLALOBOS ALFARO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2017.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR INTERINO :

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA :

**INGA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO QUÍMICO**

Título :

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS CADMIO, NÍQUEL,  
PLOMO Y ZINC EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RELLENO  
SANITARIO DE SONSONATE, EL SALVADOR.**

Presentado por :

**LUISA MARÍA MENDOZA MAGAÑA  
JAIME RODRIGO RIVAS  
KATHYA LIZZETTE VILLALOBOS ALFARO**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Asesores :

**INGA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO  
ING. LUIS RAMÓN POTILLO TRUJILLO**

San Salvador, Febrero de 2017.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores:

**INGA. ANA CECILIA DÍAZ DE FLAMENCO**

**ING. LUIS RAMÓN PORTILLO TRUJILLO**

## RESUMEN

La presente investigación consistió en la determinación de los niveles de concentración de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en matrices de agua superficial, sedimento, agua subterránea, biomasa y suelo, en la zona de influencia del Relleno Sanitario de la Región Metropolitana de Sonsonate, ubicado en el Cantón Salinas de Ayacachapa, municipio de Sonsonate, realizada para los meses de abril y mayo del año 2016. Las concentraciones de metales pesados se midieron con las técnicas Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF) y Espectroscopia de Absorción Atómica con horno de grafito.

La zona de influencia se delimitó a los 1500 m alrededor del relleno sanitario, la cual podría ser vulnerable a la contaminación por sustancias químicas (metales pesados), provenientes del mismo o de otras actividades antropogénicas observables en la zona, actividades agrícolas principalmente.

La técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total permitió la identificación de los metales Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en el caso del Cadmio los valores leídos por el equipo de TXRF fueron bajo el límite de detección del equipo (BLD) que es de 570 picogramos y para el metal plomo no se reportaron valores de concentración ya que no se realizó la curva de calibración específica para líneas  $L_{\beta}$ .

Por la técnica Espectroscopia de Absorción Atómica con horno de grafito se cuantificaron concentraciones de metales Níquel y Plomo, obteniéndose para muestras de agua y biomasa valores bajo el límite de detección del método que se aproximó a 0.000 ppm de Ni y 0.000 ppm de Pb. La cuantificación para los metales Níquel y Cadmio no fue posible debido a daños en las lámparas de tales elementos.

En su totalidad las muestras de las matrices agua superficial, sedimento, agua subterránea, biomasa y suelo, no sobrepasaron los límites permitidos por las diferentes normas de referencia para los metales pesados, por lo tanto, puede concluirse que, hasta la fecha, no hay contaminación de metales Ni, Pb y Zn en la zona por la influencia del relleno sanitario, a

excepción de la muestra BIA YOT02 con 15.31 ppm Pb que sobrepasó el rango permitido por El Codex Alimenticio (0.1 a 1 ppm).

Además, para algunas de las muestras de biomasa se calculó un coeficiente de absorción aparente de metales, que relaciona la concentración de los metales presentes en la biomasa con la concentración del suelo, para los cuales se concluyó que pueden existir otros factores externos relacionados con la absorción de metales como lo podrían ser el uso de pesticidas, fertilizantes, el tipo de agua de riego, entre otros.

Para la interpretación de las concentraciones de Níquel, Plomo y Zinc en las matrices de agua superficial, agua subterránea, sedimento, suelo y biomasa en función de la distribución geográfica de los metales, se generaron a través del programa ArcGIS, las curvas de isocontorno para representar los probables escenarios de distribución de los niveles de concentración encontrados.

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios todopoderoso**, que nos ha guiado durante toda nuestra etapa de formación como profesionales.

**A nuestros asesores, Ing. Luis Ramón Portillo Trujillo e Ingra. Ana Cecilia Díaz de Flamenco**, por todo el apoyo y transferencia de conocimientos, por los consejos, por la paciencia para lograr culminar con éxito la investigación.

**Al Lic. José Ramiro Rodríguez Carpio**, del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, por su colaboración en el área de trabajo de Laboratorio y acompañamiento durante los muestreos.

**A los Ing. Agr. Miguel Ángel Hernández Martínez e Ing. Agr. Abner Alexei Munguía Platero**, de la Escuela de posgrados de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, quien muy amablemente y con una gran disposición nos ayudó en la elaboración de los distintos mapas temáticos, que permitieron una mejor caracterización de la zona de estudio.

**Al Ing. Sergio Armando Maravilla Miranda**, de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, quien nos brindó su apoyo en la obtención de reactivos químicos necesarios para realizar los diferentes procesos de digestión de muestras.

**Al subcomisionado Hugo Adiel Bonilla Lara y agentes de la Policía Nacional Civil de Sonsonate**, que nos acompañaron durante las jornadas de muestreo, permitiendo el desarrollo de las actividades de forma segura.

**Al Laboratorio del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares**, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, por la oportunidad de utilizar sus instalaciones, equipo de análisis y de adquirir nuevos conocimientos en el área ambiental.

**A todas las personas del Cantón Salinas de Ayacachapa**, que amablemente nos permitieron recolectar muestras en sus hogares y brindaron información importante para la investigación.

*Luisa María Mendoza  
Jaime Rodrigo Rivas  
Kathya Lizzette Villalobos*

## DEDICATORIA

A **Dios**, que en su infinito amor me permite culminar una etapa más en mi vida, cada obstáculo, cada prueba, me han permitido ver su mano obrando en mí.

A **mi madre Reina Magaña**, que con sus enseñanzas me ha transformado en una mujer luchadora, me ha enseñado a jamás darme por vencida, por su amor y esfuerzos para hacer de mí una mujer profesional y sobre todo por guiarme en los caminos de Dios, la cual es mi mayor herencia. A ti madre especialmente dedico cada uno de mis triunfos. Esto es para ti.

A **mi padre Roger Aguilar**, por mostrarme que el amor no tiene condiciones, por su ayuda durante mis etapas como estudiante logrando sacar de mí siempre lo mejor, por su maravilloso ejemplo de vida. Gracias por llegar a nuestras vidas.

A **mis abuelos Roberto Magaña y Evelia de Magaña**, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, por su aliento, sus oraciones, por mostrarme con su ejemplo que con esfuerzo puede lograrse todo en esta vida, su amor es una bendición en mi vida.

A **mis hermanos Miguel Ángel y Rafael Edgardo**, porque cada triunfo es compartido, porque el amor de hermanos sobrepasa cualquier diferencia y si uno goza, gozamos todos.

A **mi novio Fernando Cuéllar**, por su paciencia, apoyo, palabras de ánimo cada vez que algo salía mal, por acompañarme durante toda esta etapa, por enseñarme que el amor es una fuerza poderosa y por estar ahí siempre a mi lado. Gracias Amor.

A **mis tíos, primos y familia**, por su apoyo y por ser para mí las personas más especiales en este mundo. Especialmente a **José y Jennifer Magaña** por ser como mis hermanos. Aun en la distancia me gozo de todo lo que han logrado. A **mi sobrino Gerson Alexander**, porque su llegada me ha llenado de felicidad, ha sido una fuerza motora para seguir luchando. Te quiero mi niño.

A **mis amigas Alejandra Calderón, Glenda Molina y Luisa Andrino**, mis compañeras de lucha universitaria, por brindarme su amistad, por acogerme en sus hogares y sobre todo por permitirme ser parte de su vida. Las quiero demasiado.

A **Kathya Villalobos y Rodrigo Rivas**, por vivir juntos esta etapa, por los altos y bajos momentos, por unirnos en una sola fuerza para lograr este triunfo... este triunfo que es de todos. Infinitas gracias por su esfuerzo y dedicación.

*Luisa María Mendoza Magaña.*

## DEDICATORIA

Agradezco primeramente a Dios todopoderoso por haberme permitido culminar mi carrera universitaria y por continuar dándome oportunidades de prepararme académicamente en distintas ramas de aplicación de la Ingeniería Químicas, ya que como dicen sus santas escrituras: "El hombre, en tanto más se prepara, Dios más lo usa.

**A mi familia, a mi madre la Licda. Gladys Edelmira Rivas Salinas, mi abuela Marta Luz Salinas, a mis 3 hermanos, Mauricio Iván, Diego Alejandro, Martha Liliana,** por su apoyo moral y económico incondicional, por su paciencia, comprensión, en todo momento a lo largo de mi carrera, lo cual fue una parte fundamental para alcanzar el éxito que hoy celebro a su lado.

**A la Ingra. Alba Marisela Saravia, a la Ingra. Delmy del Carmen Rico Peña e Ing. José Aníbal Erazo,** de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la FIA-UES, a quienes admiro mucho por darme su apoyo, por forjar en mí un criterio crítico como profesional y por ser guía a lo largo de mis días como estudiante universitario de Ingeniería Química en el alma máter.

A mis queridas compañeras en esta aventura llamada trabajo de graduación, **a Luisa María Mendoza Magaña,** quien me enseñó que las mujeres son excelentes organizando y son muy dedicadas en lo que hacen, **a Kathya Lizzette Villalobos Alfaro** por demostrarme que a pesar que hay situaciones que te pueden hacer caer, es un deber como seres humanos levantarse y ponerle el mejor rostro a la vida.

**A la Asociación General de Estudiantes de Ingeniería y Arquitectura “Silvia Estela Ayala” ASEIAS,** por permitirme conocer mis capacidades y limitaciones, pues he podido desarrollar mis competencias de liderazgo, trabajo en equipo y tomar de decisiones que influirán en el desarrollo del sector estudiantil de la FIA UES. La ASEIAS me ha enseñado mucho, no solo en el hecho de convertirme en un estudiante organizado, sino también me ha permitido desarrollar un sentido de pertenencia e identificación con la Universidad de El Salvador.

**A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura,** por ser el lugar en el que se viven tantas emociones desde enojos, tristezas, frustraciones, alegrías, cansancio, risas, satisfacciones, desvelos, pero que es la responsable de ir formando en gran parte el carácter del profesional de ingeniería y arquitectura.

*Jaime Rodrigo Rivas.*

## DEDICATORIA

*“Comienza haciendo lo que es necesario, luego lo que es posible, y de pronto te encontraras haciendo lo imposible.” – San Francisco de Asís.*

**A Dios y nuestra Virgen Santísima**, por guiarme en este camino, por darme el discernimiento para tomar las mejores decisiones y así poder alcanzar una de las metas propuestas en mi vida.

**A mi madre Ana Guadalupe**, por siempre enseñarme que puedo ser una persona de éxito en todo lo que decida hacer, por siempre creer en mí y apoyarme en todo momento. Por sus largas pláticas en la cena y sus infinitos consejos. Gracias por el amor y la confianza puestas en mí. Te amo mamá.

**A mi padre Roberto Alejandro**, por forjarme un carácter fuerte, por instruirme en la vida, por siempre estar presente en todas mis decisiones y apoyarme. Gracias papá.

**A Eduardo Reyes**, por enseñarme una filosofía de vida diferente, a sonreír a pesar de las dificultades, por aconsejarme, cuidarme, escucharme y por creer en mí más de lo que yo podría hacerlo. No hay palabras para describir el impacto que has tenido en mi vida, por esto y muchas cosas más, gracias.

**A mis compañeras y amigas, Adriana Centeno y Mariella Rivera**, por aconsejarme y tolerarme en mis momentos de estrés. Por demostrarme que a pesar de que los momentos sean difíciles, con una buena amistad pueden ser más llevaderos. Les agradezco todos los buenos momentos y experiencias que hemos compartido, porque eso me ha hecho mejor persona.

**A Luisa Mendoza y Rodrigo Rivas**, por su comprensión y apoyo durante mi recuperación, por siempre involucrarme y nunca dejarme atrás. Gracias a ustedes, al empeño y esfuerzo, lo hemos logrado.

**A mi familia**, por su apoyo incondicional, solidaridad, amor y paciencia, hasta la culminación de mi carrera.

*Kathya Lizzette Villalobos Alfaro.*

# INDICE

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
INDICE.....	vii
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xii
ABREVIATURAS Y SIMBOLOS.....	1
SIGLAS.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO 1: ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1.    CONTEXTO.....	4
1.2.    DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.3.    HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.4.    OBJETIVOS.....	13
1.4.1.    GENERAL.....	13
1.4.2.    ESPECIFICOS.....	13
1.5.    JUSTIFICACIÓN.....	14
1.6.    DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES.....	15
1.6.1.    DELIMITACIÓN.....	15
1.6.2.    LIMITACIONES.....	15
1.7.    ANTECEDENTES.....	15
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.    PROPIEDADES DE LOS METALES PESADOS.....	17
2.2.    MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO.....	18
2.3.    ABSORCIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS.....	22
2.4.    COMPONENTES DE LAS BATERÍAS.....	26
2.5.    ESTADÍSTICAS DE LAS PILAS Y BATERIAS PARA EL SALVADOR.....	30
2.6.    DISPOSICIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS EN EL SALVADOR.....	33
2.6.1.    COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS SÓLIDOS.....	39
2.6.2.    RELLENOS SANITARIOS EN EL SALVADOR.....	41
2.7.    FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL.....	49
2.8.    ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO.....	56

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	63
3.1. VISITAS EXPLORATORIAS A LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RELLENO SANITARIO.....	63
3.1.1. VISITA EXPLORATORIA I.....	63
3.1.2. VISITA EXPLORATORIA II.....	63
3.2. INVENTARIO DE PUNTOS DE MUESTREO PARA MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, SEDIMENTO, SUELO Y BIOMASA.....	64
3.2.1. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE AGUA SUPERFICIAL.....	64
3.2.2. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE SEDIMENTO.....	65
3.2.3. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	65
3.2.4. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE BIOMASA.....	67
3.2.5. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE SUELO.....	67
3.3. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO PARA LAS DIFERENTES MATRICES.....	67
3.3.1. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA MATRÍZ DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	70
3.3.2. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA MATRÍZ DE BIOMASA.....	72
3.4. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	74
3.4.1. PRESERVACIÓN Y ENVASADO.....	75
3.4.2. ETIQUETADO.....	75
3.4.3. HOJA DE MUESTREO.....	75
3.5. MAPAS DE UBICACIÓN DE PUNTOS SELECCIONADOS PARA MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, SEDIMENTO, SUELO Y BIOMASA...	76
3.6. METODOLOGÍA DE DIGESTIÓN DE MUESTRAS.....	85
3.6.1. LAVADO DE CRISTALERIA EN EL LABORATORIO.....	85
3.6.2. DIGESTIÓN DE MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL Y AGUA SUBTERRÁNEA.....	85
3.6.3. DIGESTIÓN DE MATRICES DE SUELO Y SEDIMENTO.....	86
3.6.4. DIGESTIÓN DE MATRICES DE BIOMASA.....	86
3.7. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS.....	87
3.7.1. TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL.....	87

3.7.2.	TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO.....	93
3.8.	COMPARACIÓN CON NORMAS DE REFERENCIA.....	99
	CAPÍTULO 4: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	102
4.1.	RESULTADOS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL.....	102
4.2.	RESULTADOS POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO.....	107
4.3.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN APARENTE.....	113
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	115
4.4.1.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL.....	115
4.4.2.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA TÉCNICA ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO.....	115
4.4.3.	COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS ENCONTRADOS EN LAS DIFERENTES MATRICES ANALIZADAS CONTRA NORMAS DE REFERENCIA.....	116
4.4.4.	ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN APARENTE DE METALES NÍQUEL, PLOMO Y ZINC EN MATRÍZ BIOMASA.....	119
4.4.5.	DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS METALES NÍQUEL, PLOMO Y ZINC ENTRADOS PARA LAS DIFERENTES MATRICES EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RELLENO SANITARIO DE SONSONATE.....	119
	CONCLUSIONES.....	136
	RECOMENDACIONES.....	137
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
	GLOSARIO.....	149
	ANEXOS.....	153

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.	Componente de las pilas primarias desechables.....	29
Tabla 2.2.	Componente de las pilas secundarias recargables.....	30
Tabla 2.3.	Descripción según partida arancelaria de las pilas y baterías eléctricas.....	31
Tabla 2.4.	Resumen de volúmenes de importaciones hacia El Salvador de pilas y baterías eléctricas de 2010 a 2015.....	32
Tabla 2.5.	Cantidad de municipios que disponen sus desechos en rellenos sanitarios, botaderos municipales o composteras y botadero (Diciembre, 2006).....	37
Tabla 2.6.	Cantidad de municipios sin recolección y transporte que reportan botaderos clandestinos.	37
Tabla 2.7.	Generación de desechos sólidos a nivel departamental en 2009.....	38
Tabla 2.8.	Rellenos sanitarios existentes en el país para el año 2006.....	41
Tabla 2.9.	Cantidad de desechos sólidos que son dispuestas en rellenos sanitarios para el año 2006...	42
Tabla 2.10.	Evolución del uso de rellenos sanitarios en el país, desde 1998 hasta 2009.....	43
Tabla 2.11.	Capacidad de recepción de los rellenos sanitarios, para el 2010.....	43
Tabla 2.12.	Rellenos sanitarios manuales en El Salvador para el año 2014.....	46
Tabla 2.13.	Rellenos sanitarios mecanizados en El Salvador para el año 2014.....	47
Tabla 2.14.	Total depositado en los rellenos sanitarios en El Salvador, para el 2014.....	48
Tabla 2.15.	Especificaciones del espectrómetro de absorción atómica del CIAN.....	61
Tabla 3.1.	Identificación del inventario de puntos para la matriz de agua superficial, río Pululuya...	64
Tabla 3.2.	Identificación del inventario de puntos para la matriz de sedimento del río Pululuya.....	65
Tabla 3.3.	Inventario de puntos para la matriz de agua subterránea.....	66
Tabla 3.4.	Coordenadas del inventario de puntos para la matriz de biomasa.....	68
Tabla 3.5.	Coordenadas del inventario de puntos para la matriz de suelo.....	69
Tabla 3.6.	Escalas de puntuación para método ponderado en muestreo de agua subterráneas.....	70
Tabla 3.7.	Ponderación y selección para matriz de agua subterránea.....	71
Tabla 3.8.	Escalas de puntuación para método ponderado en muestreo de cultivos.....	72
Tabla 3.9.	Ponderación y selección de puntos para la matriz de biomasa.....	73
Tabla 3.10.	Puntos seleccionados para muestras de matriz de sedimento de río.....	76
Tabla 3.11.	Puntos seleccionados para muestras de matrices de agua superficial y agua subterránea...	77
Tabla 3.12.	Puntos seleccionados para muestreo de matrices de suelo y biomasa.....	78
Tabla 3.13.	Metales que pueden determinarse en matrices de agua.....	85
Tabla 3.14.	Metales que pueden determinarse en matrices de suelo y sedimentos.....	86
Tabla 3.15.	Límites de detección del método para Ni y Pb en matrices de agua superficial, agua subterránea, sedimento, biomasa y suelo; establecidos en base a las lecturas de los blancos.....	97

Tabla 3.16.	Límites máximos permitidos del metal Cadmio, para cada tipo de matriz.....	100
Tabla 3.17.	Límites máximos permitidos del metal Níquel, para cada tipo de matriz.....	100
Tabla 3.18.	Límites máximos permitidos del metal Plomo, para cada tipo de matriz.....	101
Tabla 3.19.	Límites máximos permitidos del metal Zinc, para cada tipo de matriz.....	101
Tabla 4.1.	Concentraciones obtenidas por el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total para Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc para matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.....	105
Tabla 4.2.	Concentraciones obtenidas por el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total para Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc para matrices de biomasa y suelo.....	106
Tabla 4.3.	Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Níquel en matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.....	109
Tabla 4.4.	Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Níquel en matrices de biomasa y suelo.....	110
Tabla 4.5.	Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Plomo en matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.....	111
Tabla 4.6.	Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Plomo en matrices de biomasa y suelo.....	112
Tabla 4.7.	Consolidado de los valores de concentración para los metales Ni, Pb y Zn para matrices de biomasa y suelos.....	114
Tabla 4.7.	Coeficientes de absorción aparente de metales para Ni, Pb y Zn en matriz biomasa.....	114
Tabla A. 1.	Condiciones de preservación y envasado para muestras de agua superficial, agua subterránea, sedimento, suelo y biomasa.....	161
Tabla A. 2.	Cuadro de calibración de equipo en voltaje y amperaje para el análisis por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	206
Tabla A. 3.	Resumen de las concentraciones de Ni, Pb y Zn para las matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.....	214
Tabla A. 4.	Resumen de las concentraciones de Ni, Pb y Zn para las matrices de biomasa y suelo....	215
Tabla A. 5.	Coordenadas de los pozos abiertos en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	220

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Ubicación de los rellenos sanitarios de Sonsonate en base a la división de los municipios del departamento de Sonsonate.....	5
Figura 1.2.	Ubicación del río Pululuya en relación al relleno sanitario de Sonsonate.....	7
Figura 1.3.	Uso de suelos en la zona del relleno sanitario de Sonsonate.....	9
Figura 1.4.	Mapa de pedología en la zona del relleno sanitario de Sonsonate.....	10
Figura 1.5.	Mapa de curvas de nivel en la zona del relleno sanitario de Sonsonate.....	11
Figura 2.1.	Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales, a diferentes pH.....	13
Figura 2.2.	Índices de bioacumulación (IBA) de diversos elementos traza en plantas verdes y hongos. El IBA fue calculado como la relación de elementos traza contenidos en plantas y hongos, respecto a la concentración en los suelos.....	24
Figura 2.3.	Composición de los desechos sólidos captados en zonas urbanas.....	40
Figura 2.4.	Proporción de desechos sólidos recuperados y generados.....	40
Figura 2.5.	Ubicación geográfica de los rellenos sanitarios existentes en el país, para el año 2010...	44
Figura 2.6.	Oferta ampliada de disposición final para el año 2010.....	45
Figura 2.7.	Capas electrónicas de elementos.....	49
Figura 2.8.	Transiciones electrónicas de los orbitales atómicos.....	50
Figura 2.9.	Espectro generado con fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	51
Figura 2.10.	Fenómeno de TRXF.....	52
Figura 2.11.	Haz incidente en fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	53
Figura 2.12.	Esquema del sistema de TXRF con excitación por tubo de rayos X del CIAN.....	55
Figura 2.13.	Procesos que se llevan a cabo en la atomización de la muestra.....	58
Figura 2.14.	Esquema del sistema de absorción atómica.....	58
Figura 2.15.	Equipo de espectroscopia de absorción atómica por horno de grafito.....	61
Figura 3.1.	Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de agua superficial en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	79
Figura 3.2.	Mapa de ubicación de puntos de muestreados en matriz de agua subterránea (pozos) en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	80
Figura 3.3.	Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de sedimento en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	81
Figura 3.4.	Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de biomasa en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	82
Figura 3.5.	Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de suelo en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	83

Figura 3. 6.	Mapa de ubicación de todas las muestras seleccionadas que fueron recolectadas en zonas de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.....	84
Figura 3. 7.	Procedimiento realizado para la elaboración de la solución patrón de 3 ppm de Galio a partir de un estándar de 1000 ppm de Galio.....	88
Figura 3. 8.	Procedimiento realizado para la elaboración de la solución patrón de 5 ppm de Galio a partir de un estándar de 1000 ppm de Galio.....	89
Figura 3. 9.	Procedimiento de lavado de cuarzo para el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	90
Figura 3. 10.	Procedimiento realizado para la preparación de estándares de multi-elemento para la obtención de curvas de calibración.....	91
Figura 3. 11.	Procedimiento para la obtención de espectros por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	92
Figura 3. 12.	Metodología de cuantificación de concentraciones seguidas para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	93
Figura 3. 13.	Procedimiento realizado para la preparación del blanco utilizado en la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para matrices de agua superficial y agua subterránea.....	95
Figura 3. 14.	Procedimiento realizado para la preparación del blanco utilizado en la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para matrices de suelo, sedimento y biomasa.....	96
Figura 3. 15.	Metodología de análisis de matrices por la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito realizada con el equipo Espectrómetro iCE-3000.....	98
Figura 4. 1.	Mapa de distribución de la concentración de Níquel en las muestras analizadas de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	122
Figura 4. 2.	Mapa de distribución de la concentración de Níquel en las muestras analizadas de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	123
Figura 4. 3.	Mapa de distribución de la concentración de Níquel en las muestras analizadas de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	124
Figura 4. 4.	Mapa de distribución de la concentración de Plomo en las muestras analizadas de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	126

Figura 4. 5.	Mapa de distribución de la concentración de Plomo en las muestras analizadas de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador	127
Figura 4. 6.	Mapa de distribución de la concentración de Plomo en las muestras analizadas de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	128
Figura 4. 7.	Mapa de distribución de la concentración de Zinc en las muestras analizadas de la matriz de agua superficial en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	131
Figura 4. 8.	Mapa de distribución de la concentración de Zinc en las muestras analizadas de la matriz de agua subterránea en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	132
Figura 4. 9.	Mapa de distribución de la concentración de Zinc en las muestras analizadas de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	133
Figura 4. 10.	Mapa de distribución de la concentración de Zinc en las muestras analizadas de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador	134
Figura 4. 11.	Mapa de distribución de la concentración de Zinc en las muestras analizadas de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	135
Figura A.1.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de agua superficial.....	154
Figura A.2.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de sedimento.....	155
Figura A.3.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de agua subterránea.....	156
Figura A.4.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de cultivo).....	158
Figura A.5.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de quebradas).....	159
Figura A.6.	Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de biomasa.....	160
Figura A.7.	Etiqueta para la identificación de muestras de diferentes matrices obtenidas en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.....	162

Figura A.8.	Procedimiento de lavado de cristalería en el laboratorio.....	192
Figura A.9.	Procedimiento de digestión de matrices de agua superficial y agua subterránea.....	194
Figura A.10.	Procedimiento de previo a la digestión de matrices de suelo y sedimento.....	196
Figura A.11.	Procedimiento de digestión de matrices de suelo y sedimento.....	199
Figura A.12.	Procedimiento de previo a la digestión de matriz de biomasa.....	200
Figura A.13.	Procedimiento de digestión de matriz de biomasa.....	204
Figura A.14.	Límites de detección para el espectrofotómetro iCE 3000.....	205
Figura A.15.	Procedimiento de obtención del espectro de cuarzo por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	207
Figura A.16.	Procedimiento para obtención de los espectros de las diferentes matrices por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	208
Figura A.17.	Certificado del estándar de Galio 1000 mg/L MERCK 1.0260.0100, utilizado como estándar interno a 1 y 5 ppm en solución de muestra final.....	209
Figura A.18.	Certificado de la estándar solution IV CERTIPUR MERCK 1.11355.011 utilizada para la creación de las curvas de calibración para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.....	210
Figura A.19.	Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de biomasa.....	211
Figura A.20.	Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de agua subterránea.....	211
Figura A.21.	Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de sedimento.....	212
Figura A.22.	Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de agua superficial.....	212
Figura A.23.	Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de suelo.....	213
Figura A.24.	Trazado de las líneas isopiezas mediante interpolación a partir de cinco valores de nivel piezométrico medidos.....	216
Figura A.25.	Diferencia en el trazado de las isopiezas en un acuífero libre situado en una zona de relieve abrupto al tener o no en cuenta la topografía.....	217
Figura A.26.	Ilustración de los conceptos de acuífero libre y confinado, nivel freático, nivel piezométrico y pozo surgente.....	218
Figura A.27.	Isopiezas perpendiculares a los límites impermeables e isopiezas paralelas a los cuerpos superficiales de agua de nivel constante.....	218

Figura A.28.	Las isopiezas se cierran de forma cóncava contra las líneas que drenan el acuífero (río) y convexa contra las líneas que lo recargan.....	219
Figura A.29.	La separación entre isopiezas disminuye cerca de áreas de descarga natural y de pozos en bombeo (el gradiente hidráulico aumenta).....	219
Figura A.30.	Mapa de isopiezas.....	221
Figura A.31.	Esquema de flujo de agua subterránea (mapa isopiezas).....	222

## ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

**cm:** centímetros.

**Conc.:** concentración.

**g:** gramos.

**Kg:** kilogramos.

**m:** metros.

**mL:** mililitros.

**msnm:** metros sobre el nivel del mar.

**N:** North (Norte).

**pg:** picogramos.

**ng/mL:** nanogramo sobre mililitro.

**Ton:** toneladas métricas.

**W:** West (Oeste).

**μL:** microlitros ( $1 \times 10^{-6} L$ ).

**°C:** grados centígrados.

## **SIGLAS**

**AA:** Absorción Atómica.

**AXIL-QXAS:** AXIL-Quantitative X-ray analysis system.

**EAA:** Espectrometría de absorción atómica.

**EDXRF:** Florescencia de rayos x de dispersión de energía.

**EPA:** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental).

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

**FLAA:** Flame Atomic Absorption.

**FRX:** Florescencia de rayos x.

**GPS:** Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).

**IAEA:** International Atomic Energy Agency.

**IBA:** Índices de bioacumulación.

**MARN:** Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**MIDES:** Manejo Integral de Desechos Sólidos.

**TXRF:** fluorescencia de rayos X por reflexión total.

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos, cultivos y fuentes de agua por metales pesados está fundamentalmente relacionada con actividades humanas directas o indirectas, entre estas actividades se encuentra la disposición final de desechos.

En términos de disposición final de desechos, se adopta el relleno sanitario como un método aceptable en El Salvador. En las cercanías de un relleno sanitario la contaminación por metales pesados puede darse debido a que las pilas y las baterías depositadas como parte de los desechos sólidos, al sufrir el proceso de descomposición se oxidan, produciendo daños a la carcasa y liberando al ambiente sus componentes; siendo los principales: Mercurio, Cadmio, Níquel, Manganeso, Litio y Plomo.

Para el año 2014 según información del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en El Salvador se contaban con 17 rellenos sanitarios de los cuales nueve son manuales y ocho mecanizados, los rellenos sanitarios recibieron para este mismo año 1,111,188.21 Toneladas, siendo el mayor receptor el relleno sanitario de MIDES SEM, C.V. (Manejo Integral de Desechos Sólidos S.E.M. de C.V.) con el 60.61% y como segundo el relleno sanitario de Sonsonate con el 13.38%. El relleno sanitario de la región Metropolitana de Sonsonate que se encuentra ubicado en el Cantón Salinas de Ayacachapa, se encuentra en funcionamiento desde el año 2001 hasta la fecha, posee 15 años de vida útil.

La contaminación de suelos y agua por metales pesados tiene graves consecuencias en la salud humana, la exposición a los mismos a lo largo del tiempo está relacionada con varios tipos de cáncer, problemas en el desarrollo de fetos y niños, artritis, enfermedades cardiovasculares, dolencias renales, entre otros. Por ello es importante estudios que involucren análisis de suelos, cultivos y fuentes de agua en relación a estos contaminantes, sobre todo por la probabilidad de la liberación de los mismos al ambiente. Estas concentraciones pueden ser determinadas por medio de la técnica normada absorción atómica y comparada con normas aplicables al país para cada matriz analizada.

**CAPÍTULO 1: ALCANCES  
Y PLANTEAMIENTO DEL  
PROBLEMA.**

## 1.1. CONTEXTO

La ciudad de Sonsonate es un municipio y cabecera del departamento homónimo, su territorio es de 232.53 Km<sup>2</sup>, su altitud de 225 metros sobre el nivel del mar (msnm) y su clima es cálido. Se encuentra limitado al Norte por los municipios de San Antonio del Monte, Nahuizalco, Sonzacate, Izalco, Nahuilingo y Caluco; al Sur, por el océano pacífico; al Este por Cuisnahuat y Santa Isabel Ishuatán y al Oeste por Acajutla y Santo Domingo de Guzmán.

El municipio de Sonsonate se divide en 12 cantones, que a su vez se dividen en caseríos, cuenta con 108,116 habitantes, con una densidad de 466 habitantes por km<sup>2</sup>, el 44.7 % de la población (48,371 habitantes) viven en zonas urbanas y el 55.3 % (59,745 habitantes) viven en zonas rurales.

Con respecto al relleno sanitario, al momento de solicitar el permiso ambiental, para el proyecto “Relleno Sanitario de la Región Metropolitana de Sonsonate”, se presentó una observación referente al terreno donde se pretendía desarrollar el mencionado proyecto, este se encontraba ubicado en jurisdicción de Cuisnahuat y no de Sonsonate (véase Figura 1.1). Al existir la duda a que municipio pertenece, pero identificando la posibilidad de que sea beneficioso al departamento y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, concuerdan apoyar el desarrollo del proyecto de “Relleno Sanitario”, desarrollado por la Alcaldía Municipal de Sonsonate (Resolución MARN-Nº 106-2000).

Por lo tanto, en la resolución MARN-Nº 101-2001, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales establece que el Relleno Sanitario de la Región Metropolitana de Sonsonate se encuentra situado en el Cantón Salinas de Ayacachapa, perteneciente al municipio de Sonsonate, departamento de Sonsonate, con una extensión de terreno de 85 manzanas con 6,491.5 varas cuadradas y con coordenadas aproximadas al centro del área del proyecto N 13° 34' 37.9'' y W 89° 40' 10.48''.

De la Figura 1.1. se debe tomar en consideración únicamente el relleno sanitario mecanizado, del cual se estudiará la zona de influencia en la presente investigación.

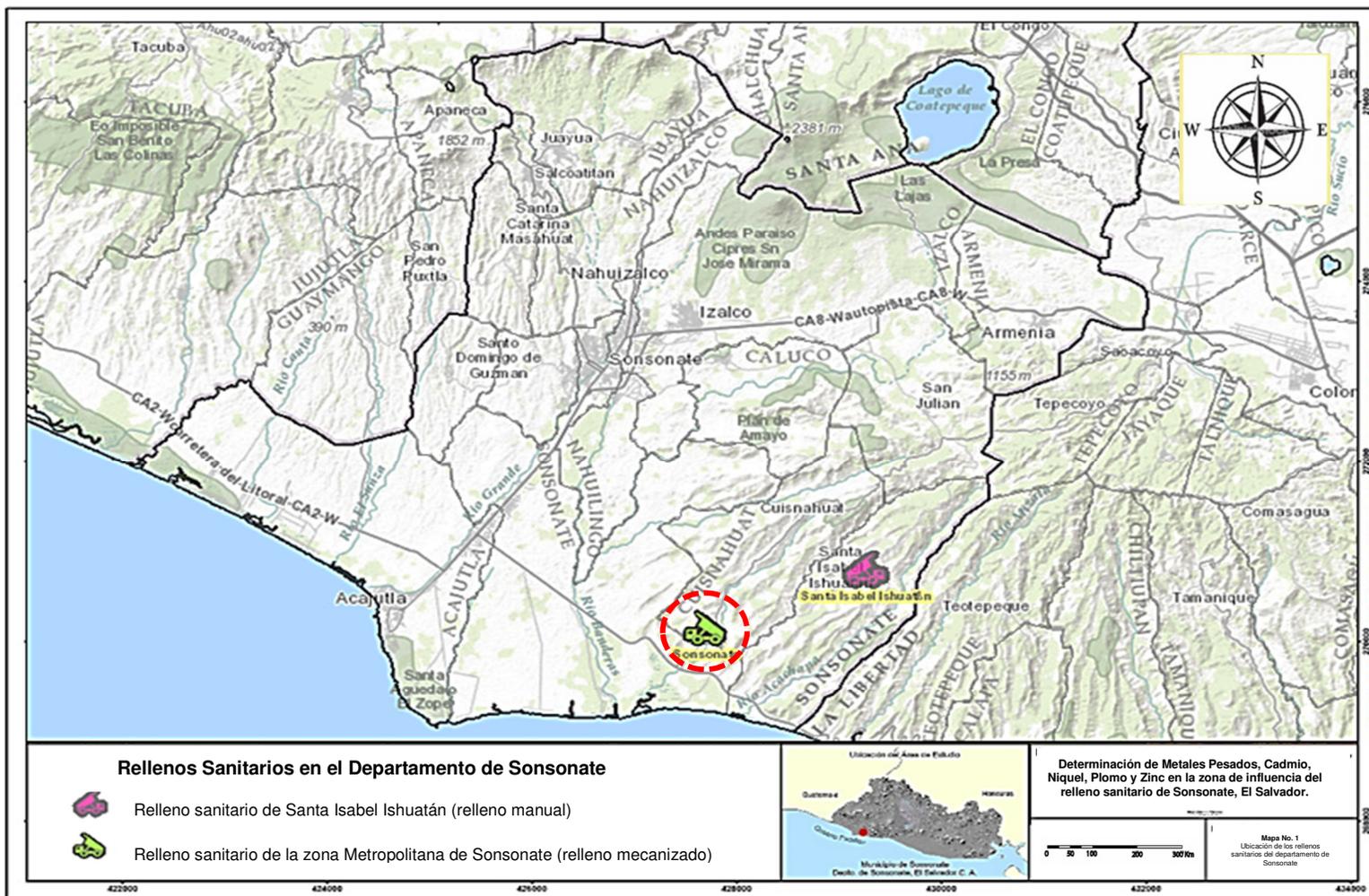


Figura 1. 1. Ubicación de los rellenos sanitarios de Sonsonate en base a la división de los municipios del departamento de Sonsonate (Febrero 2016). Fuente: Elaboración propia utilizando la base cartográfica proporcionada por Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Actualmente el relleno sanitario se encuentra operando bajo la administración de CAPSA de C.V. (Coordinadora y Asesora de Proyectos, S.A. de C.V.), recibiendo un aproximado de 413.12 Ton/diarias de desechos sólidos.

La ubicación del relleno sanitario es de fácil acceso, ingresando por la carretera del Litoral y entrando dos kilómetros por la calle que conduce a Cuisnahuat; y como recurso hídrico a menos de un kilómetro se cuenta con el río Pululuya que corre paralelo a la propiedad, el cual, es hábitat de cangrejos y peces (véase Figura 1.2).

El terreno donde se encuentra el relleno sanitario está en el límite de la región Hidrográfica “E” y comprende las pequeñas cuencas ubicadas entre la cordillera del Bálsamo y la costa del Océano Pacífico, en los departamentos de Sonsonate, La Libertad, San Salvador y La Paz, los límites este y oeste son las regiones “F” y “D”.

En relación al clima, la región “E” pertenece a la región climática de trópicos semihúmedos, de acuerdo a la clasificación de Koppen, quien considera que la mejor expresión de los efectos del clima es la vegetación nativa, la que a su vez está relacionada directamente con la elevación del terreno.

En la región se tienen las mayores precipitaciones del país y se identifican cuatro zonas climatológicas siendo la de interés para este estudio, la zona sabana tropical caliente. La sabana tropical caliente o tierra caliente comprende entre elevaciones de 0 a 800 msnm, siendo esta la Llanura Aluvial Costera; con variaciones de 18° a 28° C, los cultivos predominantes son: cereales, pastos, caña de azúcar y matorrales. Los suelos cercanos a la ubicación del relleno sanitario de Sonsonate son utilizados para granos básicos, pastos cultivados, caña de azúcar y bosques de galería (véase Figura 1.3).

De acuerdo a la distribución de zonas climáticas en El Salvador, Salinas de Ayacachapa se encuentra en la clasificación de tierra caliente. Esta zona se extiende de 0-800 msnm; con temperatura media anual de 22-27° C y predominando los vientos con rumbos Noreste.

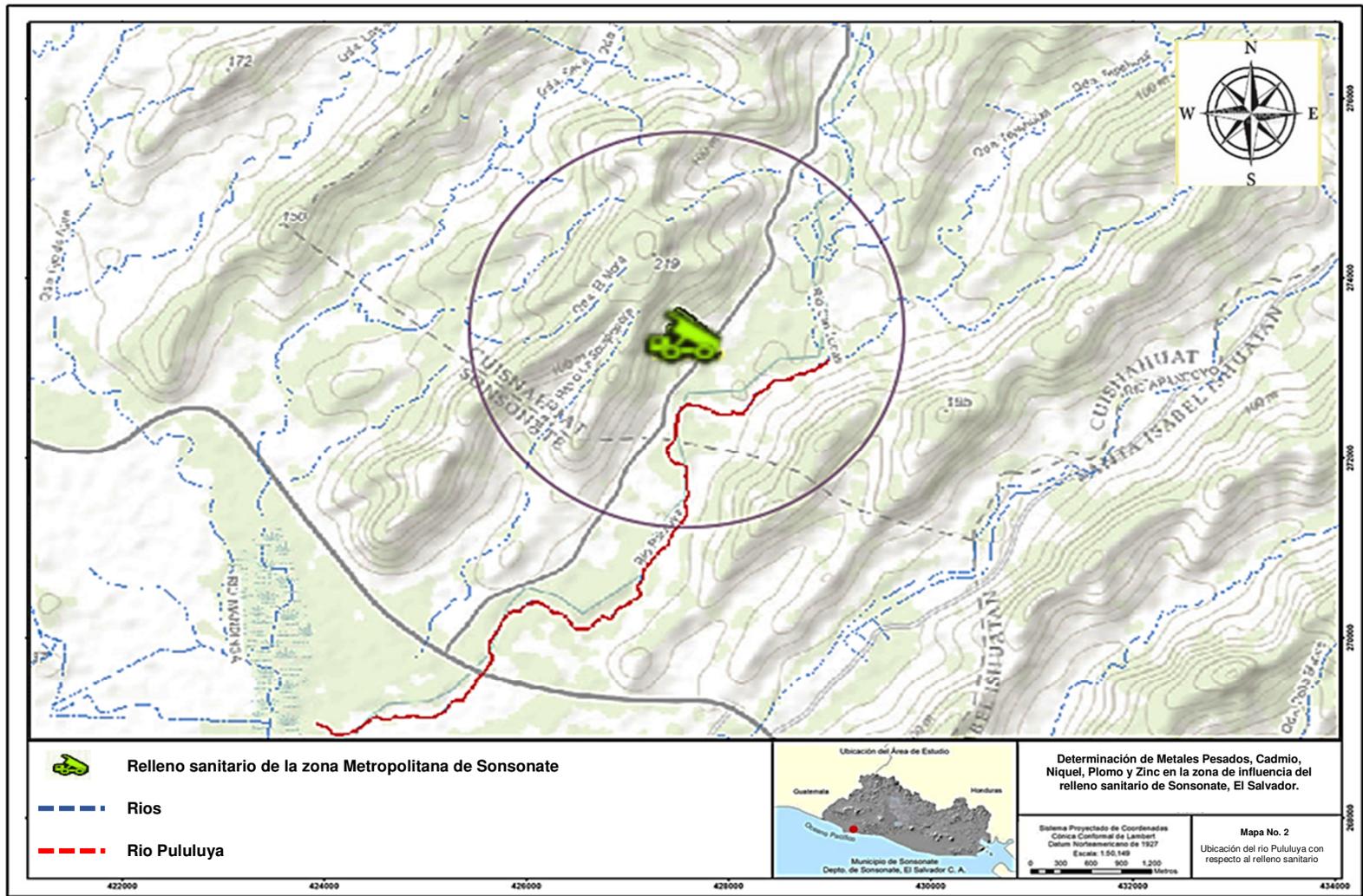


Figura 1. 2. Ubicación del río Pululuya en relación al relleno sanitario de Sonsonate (Febrero 2016). Fuente: Elaboración propia utilizando la base cartográfica proporcionada por Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

La zona donde está ubicado el proyecto está formada por rocas de origen volcánico pertenecientes al Cuaternario y Terciario, los centros de origen de los materiales volcánicos Terciarios se desconocen, en parte fluyeron por fisuras, mientras que las rocas volcánicas cuaternarias fueron expulsadas por los centros volcánicos ubicados al norte de la región.

La textura superficial del suelo es franco arcilloso y en las zonas destinadas para el relleno sanitario es franca, el subsuelo tiene una textura arcillosa con una profundidad promedio de un metro, con alto grado de pedregosidad desde la cota 75 hasta la 200.

La topografía varía de alomada a montañosa de pendientes fuertes y quebradas profundas; con estratos inferiores variables; lavas, lodos volcánicos, tobas y aun materiales volcánicos finos (cenizas, escoria volcánica y lapilli).

Con respecto a la pedología de la zona, se observa, que en su mayoría lo suelos son latosoles arcillo rojizos, por otra parte, en su minoría son aluviales y grumosoles, como se puede observar en la Figura 1.4.

Con relación a la permeabilidad, es buena en la cota 100-1500 y baja desde las cotas 100 a 22 provocando en estas una escorrentía rápida (véase Figura 1.5). La pendiente en la zona del relleno es de 20 a 30% y en el sector poniente del 30 a 50%.

Los datos del nivel freático fueron obtenidos de los pozos cercanos a la zona en donde se observó a 14 msnm, el terreno tiene su nivel en 20 msnm e inicia con la primera terraza en el nivel 26 msnm, lo que queda una profundidad de 12 metros al nivel freático.

En general, en la zona del proyecto, la superficie freática se localiza entre los 50 y 10 metros debido a la elevación que cobra el terreno de 26 a 100 metros.

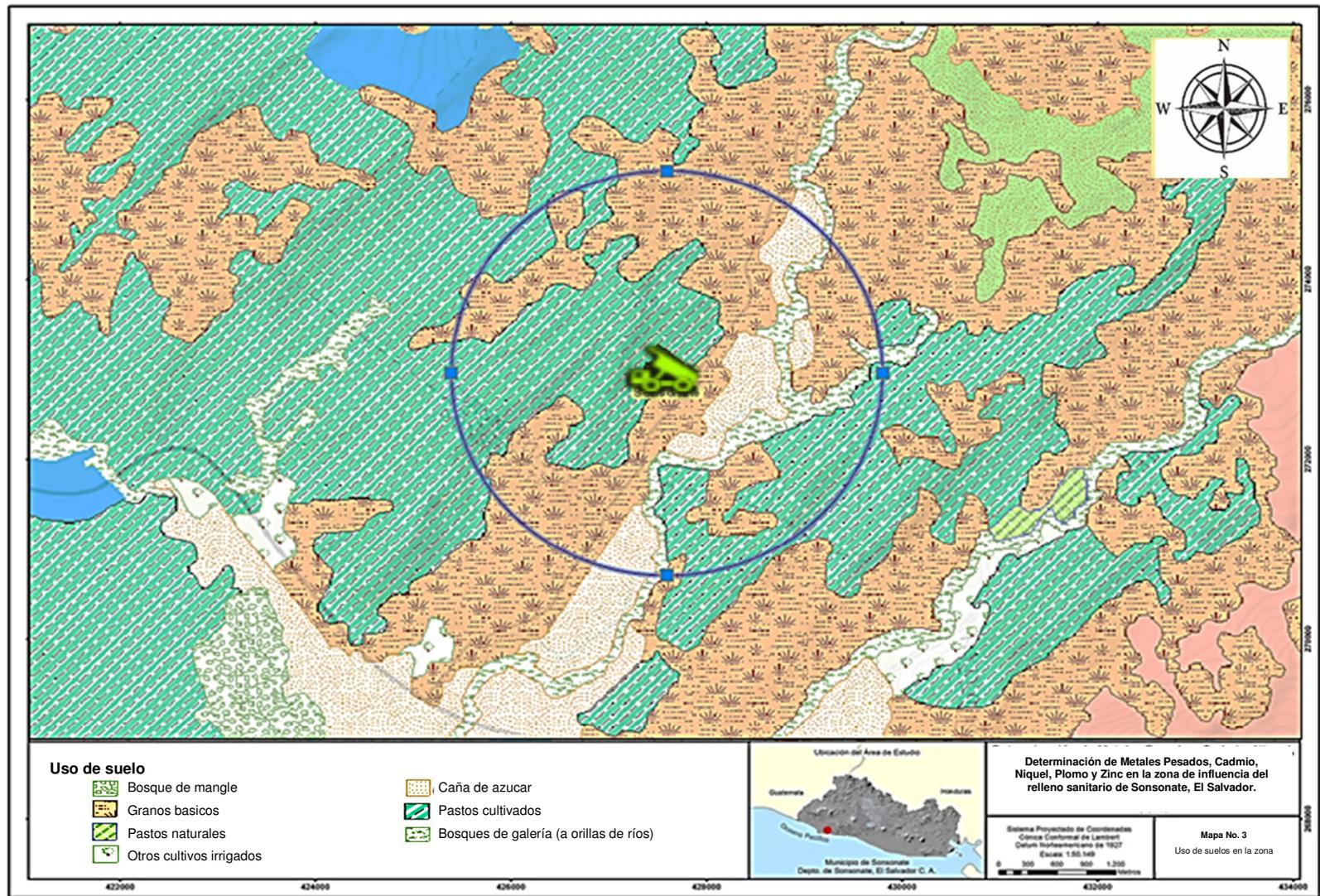


Figura 1. 3. Uso de suelos en la zona del relleno sanitario de Sonsonate (Febrero 2016). Fuente: Elaboración propia utilizando la base cartográfica proporcionada por Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

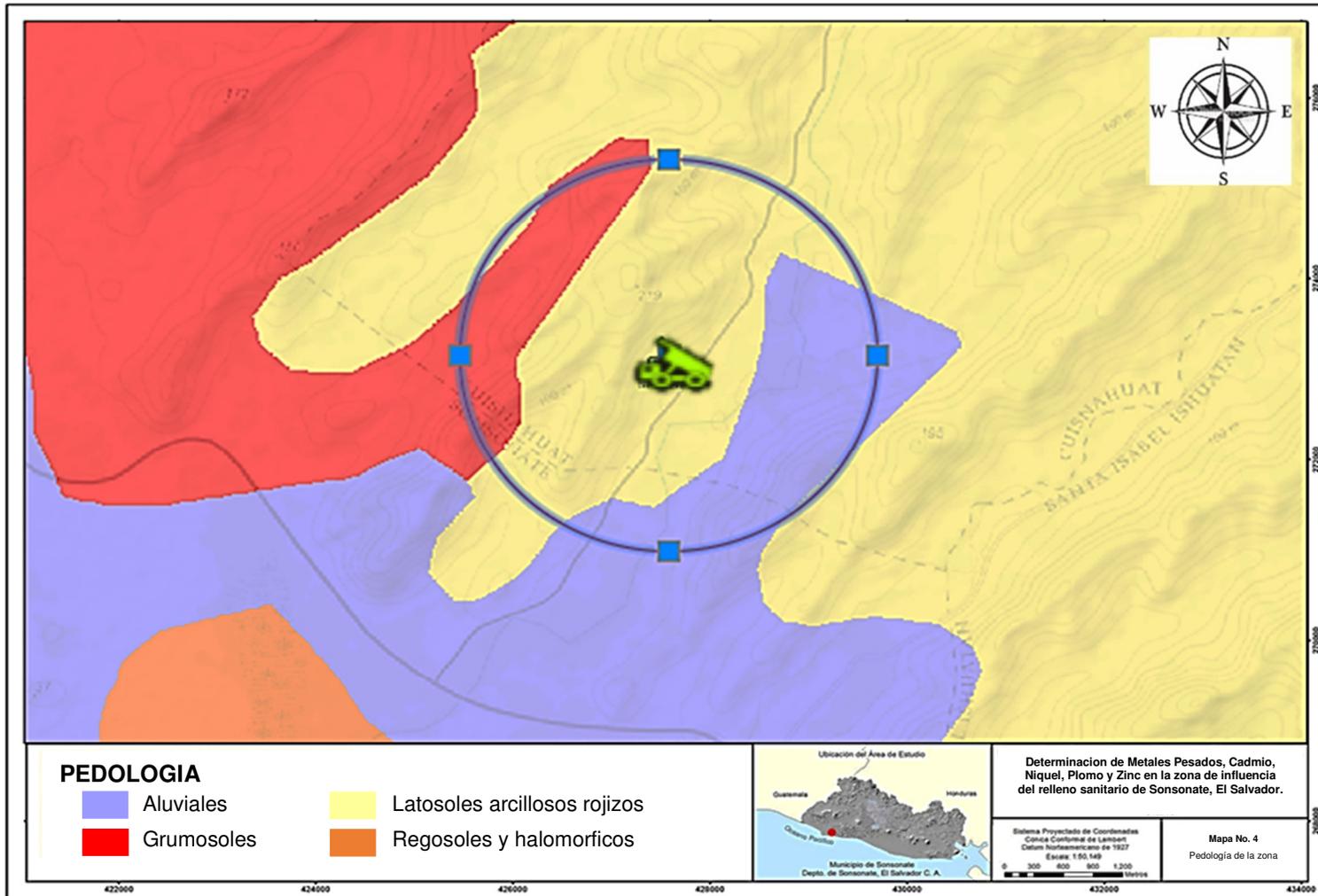


Figura 1. 4. Mapa de pedología en la zona del relleno sanitario de Sonsonate (Febrero 2016). Fuente: Elaboración propia utilizando la base cartográfica proporcionada por Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

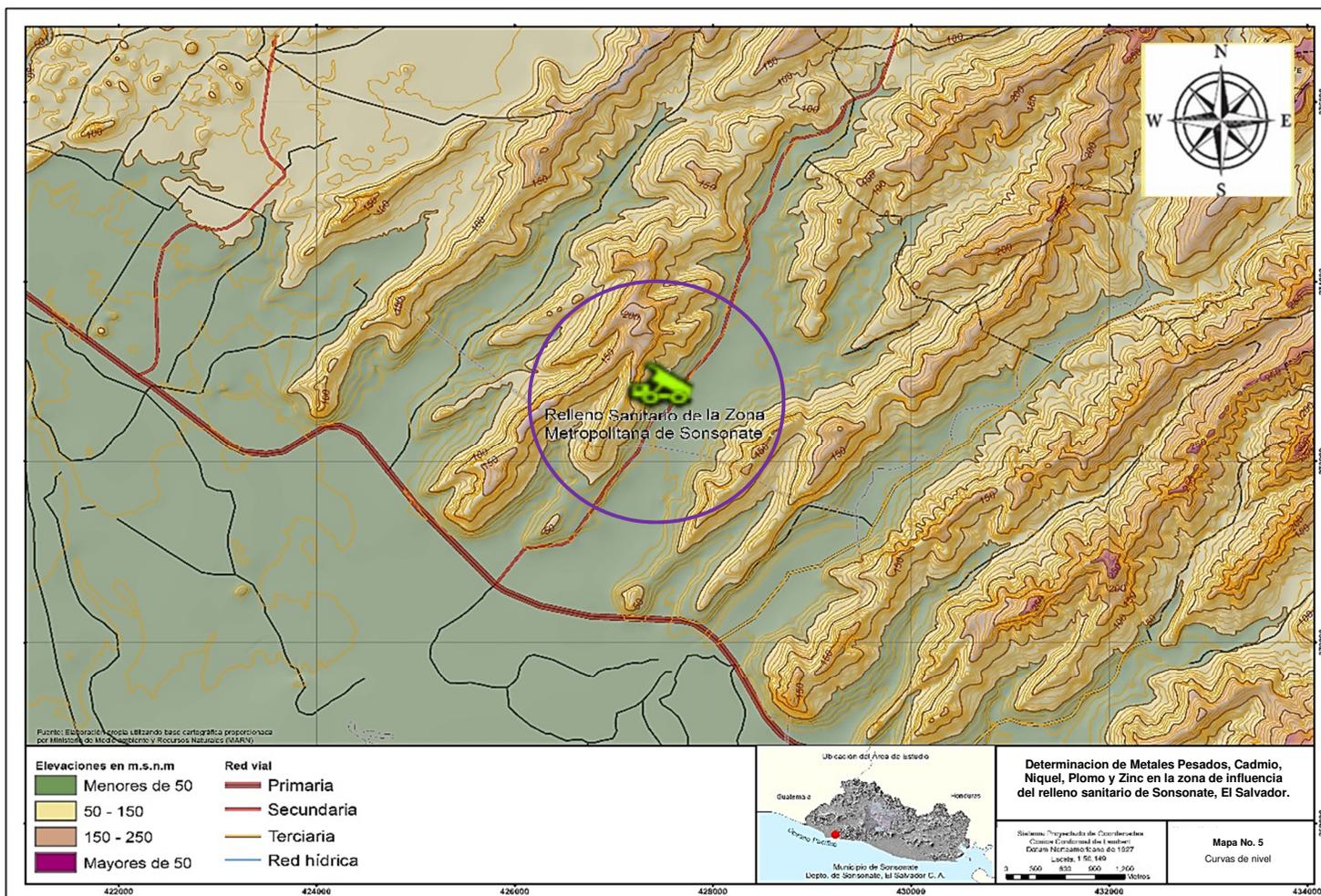


Figura 1. 5. Mapa de curvas de nivel en la zona del relleno sanitario de Sonsonate (Febrero 2016). Fuente: Elaboración propia utilizando la base cartográfica proporcionada por Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Los metales pesados como Cadmio (Cd), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) se encuentran en los desechos sólidos urbanos debido a los residuos de baterías de automotores y pilas secas de uso común en los hogares (Quinteros, Ramírez y Ramos, 2013). Los rellenos sanitarios al recibir este tipo de desecho representan una probable fuente de contaminación, la cual, es concentrada en los lixiviados producidos por los residuos sólidos urbanos, estos al tener contacto con el suelo pueden contaminarlo; esta contaminación se ve reflejada en los cultivos que absorben de este los contaminantes y de fuentes de agua superficial o subterránea. La contaminación de aguas superficiales y subterráneas puede generarse en rellenos sanitarios que no han sido diseñados según las normas técnicas adecuadas y la correcta clasificación de acuerdo al tipo de desechos generados (Rivera y Aparicio, 2009).

En El Salvador, según estadísticas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para el año 2014 se establece una cobertura diaria de 3,086 Ton/diaria, en términos departamentales, para el mismo año, los poseedores de la mayor recepción de desechos sólidos son Manejo Integral de Desechos Sólidos S.E.M. de C.V. (MIDES) con 56,126.39 Ton/mes y después le sigue el relleno sanitario de la región Metropolitana de Sonsonate (CAPSA) con 12,393.49 Ton/mes. Debido a la alta cantidad de recepción de desechos sólidos que tiene el relleno sanitario de Sonsonate, se hace necesario realizar investigaciones que permitan conocer los niveles de concentración de estos contaminantes en las zonas de influencia de los rellenos sanitarios; entendiéndose como zona de influencia el territorio donde potencialmente se manifiestan los impactos de la obra sobre la totalidad del medio ambiente o sobre alguno de sus componentes naturales, sociales o económicos.

## **1.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN**

Los niveles de concentración de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate sobrepasan los valores permitidos por la normativa ambiental para las muestras de agua superficial, agua subterránea, suelo, sedimento de río y biomasa representativa de la zona.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. GENERAL**

Determinar la concentración de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en matrices de agua superficial, sedimentos, agua subterránea, suelo y biomasa, para establecer así una línea base de la presencia de estos metales en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate.

### **1.4.2. ESPECÍFICOS**

- a. Identificar semi-cuantitativamente la presencia de Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en biomasa de cultivos, matrices de suelos, muestras de agua subterránea, agua superficial y sus sedimentos, mediante la técnica de análisis fluorescencia de rayos X por reflexión total.
- b. Cuantificar la presencia de los metales pesados identificados en las matrices de suelo, agua y biomasa por la técnica de espectroscopia de absorción atómica.
- c. Calcular un coeficiente de absorción aparente de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc, en las matrices de biomasa de cultivos específicos en la zona de estudio.
- d. Comparar los resultados de los análisis con la norma salvadoreña obligatoria NSO 13.07.01:08 para muestras de agua, CODEX STAN 193-1995 para muestras de cultivos locales, normativa del real decreto de España, NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y los límites definidos en el convenio de Basilea para matrices de suelo. Esto con fin de establecer si se cumplen los valores permisibles de las concentraciones de metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

Según las últimas estadísticas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), para el año 2014, el relleno sanitario de la región metropolitana de Sonsonate que se encuentra ubicado en el Cantón Salinas de Ayacachapa, es el segundo con mayor recepción de desechos sólidos en El Salvador.

El relleno sanitario de la región Metropolitana de Sonsonate, se encuentra en funcionamiento desde el año 2001 hasta la fecha, posee 15 años, de una vida útil de 26 años. La vida útil de un relleno sanitario puede verse afectada por las diversas variaciones climáticas, así fue, que el 16 de octubre del 2011, como consecuencia de la depresión tropical 12E el relleno sanitario sufrió un deslave, esto afectó la infraestructura del relleno sanitario, generando medidas de adecuación.

La contaminación por metales pesados a partir de un relleno sanitario, puede darse debido a que las pilas y baterías al oxidarse por efecto del proceso de descomposición, dañan la carcasa y liberan al ambiente sus componentes; los principales componentes de las pilas son: Mercurio, Cadmio, Níquel, Manganeso, Litio y Plomo.

Esta probable contaminación de suelos y agua por metales pesados tiene graves consecuencias en la salud humana, por lo tanto, los puntos de muestreo comprenderán aguas subterráneas (de pozo), agua superficial, sedimentos, matrices de suelo y biomasa de cultivos locales en la zona indicada.

Además de identificar si los niveles de concentración de los metales pesados Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc sobrepasan los valores permitidos por la normativa ambiental para las muestras de agua superficial, agua subterránea, suelo, sedimento de río y biomasa representativa de la zona; los resultados obtenidos constituirán la línea base de los niveles de concentración de estos metales, los cuales debido a que no hay investigaciones previas en la zona de estudio, podrán ser utilizados en futuros proyectos para fundamentar propuestas de planteamiento de medidas de mitigación, adaptación y monitoreo para poder inferir acerca del funcionamiento del relleno sanitario y su impacto en la zona de influencia.

## **1.6. DELIMITACIÓN Y LIMITACIONES**

### **1.6.1. DELIMITACIÓN**

La zona de influencia abarcó un radio aproximado de 1500 m alrededor de la ubicación del relleno sanitario de Sonsonate, este criterio se basó en los requerimientos mínimos del Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos (estar ubicado a una distancia de 500 metros de los núcleos poblacionales).

En relación a los puntos de muestreo, estos se seleccionaron en función de la ubicación de los cultivos de interés.

### **1.6.2. LIMITACIONES**

El monitoreo de metales pesados en aguas subterráneas se limitó a los pozos que actualmente existen en la zona, pues no se contempló la construcción de los mismos para los fines de este trabajo de investigación.

La investigación se realizó únicamente para los meses de abril y mayo del año 2016, por lo tanto, no se apreció la influencia del aumento de las escorrentías en la concentración de los metales pesados analizados.

## **1.7. ANTECEDENTES**

En El Salvador no se dispone de Normativas específicas para la recolección de desechos municipales ni para la correcta separación de las pilas y baterías en los hogares y oficinas; según Ortez y Parada (2008), las pilas, al ser desechadas en la basura o en cualquier sitio, al paso del tiempo, se oxidan por el efecto del proceso de descomposición de sus elementos y de la materia orgánica que las circunda, provocando daños a la carcasa o envoltura y por consiguiente, la liberación al ambiente de sus componentes tóxicos a los suelos cercanos y a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Lo cual establece la probabilidad de que se sobrepasen los niveles de concentración permisibles para estos metales en la zona de estudio.

A pesar de ello, dentro de las investigaciones generadas por la Universidad de El Salvador, se propusieron sistemas de gestión en relación al manejo de desechos sólidos, estos fueron: Propuesta para la gestión ambiental de pilas y baterías fuera de uso en El Salvador (Ortez y Parada, 2008) y Propuesta de un sistema de gestión integral de residuos sólidos municipales en el municipio de Ayutuxtepeque, San Salvador, El Salvador (Alvarado, Amador y Cuellar, 2012); estas son una iniciativa para la disminución de concentración de metales pesados en los lixiviados de los rellenos sanitarios.

Para la determinación de las concentraciones de los metales pesados en la zona del acuífero, fue necesario medirlos por medio de la técnica de análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Este método es cuali-cuantitativo basado en la medida de las intensidades de los rayos X característicos emitidos por los elementos que constituyen la muestra (Quinteros, Ramírez y Ramos, 2013). En relación a la contaminación de suelos por metales pesados, según Huertos y Baena (2008), los metales pesados y en general los elementos traza, están presentes en relativamente bajas concentraciones en la corteza terrestre, los suelos y las plantas.

# **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

## 2.1. PROPIEDADES DE LOS METALES PESADOS

### I. Propiedades físicas.

Un metal se conoce por su habilidad para conducir calor y electricidad. Están agrupados en la tabla periódica de los elementos, los que tienen de uno a tres electrones de valencia, siendo sus átomos poco electronegativos y teniendo una baja energía de ionización. Los metales tienen ciertas propiedades físicas: pueden ser brillantes, tener alta densidad, ser dúctiles y maleables, tener un punto de fusión alto, ser duros y ser buenos conductores del calor y electricidad.

Los metales pueden formar aleaciones entre sí y se clasifican en:

- a. Ultraligeros: densidad en  $\text{g/cm}^3$ , inferior a 2, los más comunes de este tipo son el magnesio y el berilio.
- b. Ligeros: densidad en  $\text{g/cm}^3$ , de 2 a 4.5, los más comunes de este tipo son el aluminio y el titanio.
- c. Pesados: densidad en  $\text{g/cm}^3$ , mayor a 5.0, son la mayoría de los metales.

Pearson (1973), clasificó a los metales de acuerdo al principio de ácidos fuertes o débiles. Según la denominación de ácidos fuertes son moléculas pequeñas que tienen carga positiva y un par de electrones no compartidos en su valencia; esto resulta en una alta electronegatividad y baja polarización, que hace que el agua sea más fuertemente atraída a estos ácidos.

Nieboer y Richardson (1980), propusieron otro sistema de clasificación, este se basa en la constante de equilibrio, que describe la formación del complejo entre el ión metálico y el ligando. Los metales se separaron en tres categorías, clase A, clase B y los iones en la frontera. La clase A tiene la siguiente secuencia para ligarse con  $\text{F} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$ ; para metales que se unen donando electrones en ligandos con:  $\text{O} > \text{S} > \text{Se} > \text{N} > \text{As}$ . La clase B tiene preferencia por:  $\text{O} > \text{N} > \text{S}$ . Los elementos en la frontera forman un grupo intermedio y se ligan a cualquiera de estos ligandos sin ninguna preferencia de secuencia.

## II. Propiedades químicas.

Los metales son especialmente importantes debido a su característica de acumulación en los organismos. Muchos metales se llaman “pesados” debido a que su densidad es mayor a 5 g/cm<sup>3</sup>, o cuyo número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos. Como su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%, también se les conoce como metales traza.

Desde el punto de vista químico, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición, incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio. Estos elementos tienen una gravedad específica significativamente superior a la del sodio, calcio y otros metales ligeros. Por otro lado, estos elementos se presentan en diferentes estados de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad, carga iónica y solubilidad en agua.

La solubilidad de los iones metálicos aumenta por la presencia de “agentes quelantes o secuestradores”. La molécula quelante forma un anillo, en el que el ión metálico se sostiene por su fuerza de atracción entre átomos, de modo que el ión no se separa para formar una sal insoluble. La fuerza de atracción de la molécula está formada por átomos, que generalmente son átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre, cada uno de los cuales dona dos electrones para formar un enlace “coordinado” con el ión. La quelatación permite que el ión metálico central se pueda unir a más de un sitio, dando como resultado compuestos con propiedades químicas diferentes a las del metal original (Adriano, 1992). El material orgánico natural presente en el agua, como las sustancias húmicas, pueden secuestrar a los metales y definir su destino final y transporte en el ambiente.

### **2.2. MOVILIZACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO**

La contaminación del suelo por metales pesados está fundamentalmente relacionada con diferentes tipos de actividades humanas. Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos en el mismo, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo

mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Giuliano, Moscardini, Toro y Pagnanelli, 2004).

Los metales pesados adicionados a los suelos se redistribuyen y reparten lentamente entre los componentes de la fase sólida. Dicha redistribución se caracteriza por una rápida retención inicial y posteriores reacciones lentas, dependiendo de las especies del metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo. La movilidad relativa de los elementos traza en suelos es de suma importancia en cuanto a su disponibilidad y su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y difiere de si su origen es natural o antrópico y, dentro de este último, al tipo de fuente antrópica (Burt et al., 2003; Davis et al., 1995).

Según Rauret, Rigol y Sauquillo (2003), los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son:

- I. Características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de cambio, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, entre otros.
- II. Naturaleza de la contaminación: origen de los metales y forma de deposición.
- III. Condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad, entre otros.

La movilización es relativa a todos estos factores, pero especialmente a aquellos que afectan a la transferencia desde fases sólidas a líquidas. Según Alloway (1995) los mecanismos por los cuales los elementos traza de los suelos contaminados pueden ser movilizados son:

- I. Acidificación: resultado de la oxidación de sulfuros minerales precipitados y de fertilizantes de  $\text{NH}^4$ , por la fijación biológica de nitrógeno, por precipitación atmosférica ácida ( $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ ) sobre los suelos, por descomposición de materia orgánica, por agotamiento de bases por lixiviación y por vertidos de contaminantes ácidos.
- II. Cambios en las condiciones redox: condiciones oxidantes pueden causar la oxidación y disolución de sulfuros insolubles. A la inversa, condiciones reductoras pueden

conducir a la disolución de óxidos y a la liberación de sus elementos traza coprecipitados en la solución. Fortísimas condiciones reductoras también darán lugar a la precipitación de sulfuros insolubles de elementos traza.

- III. Complejación de especies metálicas con ligandos orgánicos: los ligandos son constituyentes químicos que se combinan con los metales en un complejo químico.
- IV. Cambios en la composición iónica de la solución del suelo, que pueden tener un marcado efecto en la adsorción de elementos traza y su incorporación en complejos inorgánicos solubles e insolubles. Hay cuatro tipos de efectos: competición por los sitios de adsorción (por ejemplo,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  inhibiendo la adsorción de  $\text{Cd}^{2+}$ ); formación de complejos solubles (con aniones como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ); formación de compuestos insolubles como  $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ ; efectos de fuerza iónica, de manera que incrementos en la fuerza iónica de la solución del suelo como resultado de la contaminación, aplicación de fertilizantes o salinidad puede conducir a una adsorción reducida y a la desorción de metales de lugares de la superficie.
- V. Metilación: metales como Arsénico (As), Mercurio (Hg), Antimonio (Sb), Selenio (Se) y Estaño (Sn) pueden ser transformados en metilespecies, como  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ . La metilación puede afectar al movimiento y pérdida de ciertos elementos traza y también su toxicidad para organismos vivos; así las especies metil-As son menos tóxicas que las formas inorgánicas, mientras que las especies metil-Hg son más tóxicas. Las metilespecies pueden volatilizarse y perderse a la atmósfera y pueden también acumularse en la materia orgánica del suelo o en tejidos ricos en lípidos de raíces de plantas y fauna del suelo.

Debido a la toxicidad potencial directa sobre la biota y la amenaza indirecta sobre la salud humana por la contaminación de las aguas subterráneas y la acumulación de los mismos en los cultivos, existe un interés generalizado en cuanto al destino de los metales pesados en

suelos contaminados (Martínez y Motto, 2000). Según Dorronsoro y García (2007), en general los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías:

- I. Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo.
- II. Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas.
- III. Pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- IV. Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

La toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema. Un factor importante que gobierna la movilidad, toxicidad y biodisponibilidad de los metales pesados es su especiación (Buatier et al., 2001): estado, fase/s o forma/s química/s en que se encuentra un determinado elemento en el suelo.

La movilidad natural de los metales pesados en los suelos es consecuencia de la actividad biológica, de las interacciones sólido-líquido y de la acción del agua (Bourg, 1995). Cuando el agente causante de la movilización de los metales es el agua, éstos pueden sufrir diferentes procesos de migración en forma soluble o lavado, y en forma particulada:

- I. Lavado ascendente, incluso precipitando en la superficie del suelo formando, generalmente, sales hidratadas, y/o
- II. Lavado descendente, pudiendo perderse del perfil, alcanzando la capa freática, si existe, y llegar a las aguas subterráneas, y/o
- III. Lavado lateral desde zonas topográficamente más altas hacia zonas topográficamente más bajas, y/o
- IV. Arrastre disuelto por las aguas de escorrentía, por la superficie del suelo.
- V. Arrastre particulado desde zonas topográficamente más altas hacia zonas más bajas.

La circulación de metales con las aguas está influenciada por el balance hídrico del agua en el suelo, donde interviene la cantidad de precipitación, evaporación, escorrentía e infiltración

del agua, en función de las propiedades fisicoquímicas del suelo. Es de resaltar la influencia que ejerce el pH del suelo, ya que la mayoría de los elementos traza, con la excepción de Mo, As y Se, son más móviles en condiciones de acidez creciente (Alloway, 1995).

Por otra parte, los factores que condicionan la migración de los metales arrastrados por el agua en forma particulada son los relativos a la naturaleza, tamaño de las partículas y al flujo de agua. El viento es un agente que también produce la movilización o migración en forma particulada de los metales pesados que se encuentran en la superficie del suelo. En este caso, los factores que gobiernan el proceso son la naturaleza de las partículas que transporta y la intensidad del viento.

### **2.3. ABSORCIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS**

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta. Todas las plantas absorben metales del suelo donde se encuentran, pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo.

Algunas plantas son capaces de acumular cantidades excesivas de metales pesados, y se les conoce con el término "hiperacumuladoras" que fue introducido primero por Brooks y colaboradores (1977), refiriéndose originalmente a las plantas que adquirieron una concentración excesiva del Níquel (1000 mg/g) sobre una base del peso seco. El concepto fue ampliado más adelante a otros elementos tales como Cadmio, Cobalto, Cobre, Plomo, Selenio y Zinc.

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales, pueden ser atribuidas precisamente a la capacidad de retención del metal en cuestión, por el suelo de cultivo y a la interacción planta-raíz-metal y al metabolismo vegetal propio (Vig et al., 2003).

En la Figura 2.1 se puede apreciar un esquema donde se muestra el porcentaje de metales que puede ser absorbido por el suelo dependiendo del pH. La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto el Arsénico (As), Molibdeno (Mo), Selenio (Se) y Cromo (Cr), los cuales tienden a estar más disponibles a pH alcalino (Kabata-Pendias, 2000). El pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución como hidroxicomplejos. Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles. Tal es el caso de los siguientes metales: Se (Selenato y/o Selenito), V (Vanadato), As (Arseniato y/o Arsenito), Cr (Cromatos).

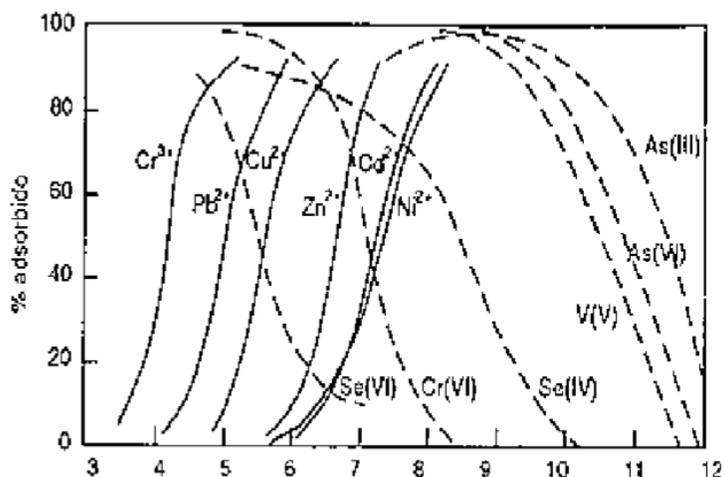


Figura 2. 1. Influencia del pH sobre la adsorción de algunos metales, a diferentes pH. Fuente: Kabata Pedias, A. (2000). *Elementos traza en suelos y plantas*. Editor CRC Press. Boca Ratón, EE.UU.

La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo (y, por tanto, también su solubilidad). La Figura 2.2 muestra una representación de diferentes grados de bioacumulación de metales en planta verdes y hongos (Kabata-Pendias, 2000). Estos autores plantean una clasificación para la bioacumulación desde ligera hasta muy intensa.

Algunos autores señalan que algunos metales presentes en el suelo, para las plantas, tienen mayores niveles de absorción. Por ejemplo, la absorción del Manganeseo (Mn) disponible en

suelos por parte de las plantas es mayor que para el Zn, seguidos en orden por el Cd, el Cobre (Cu) y por último y menos biodisponible, para pasar la barrera suelo-raíz-planta, el Pb.

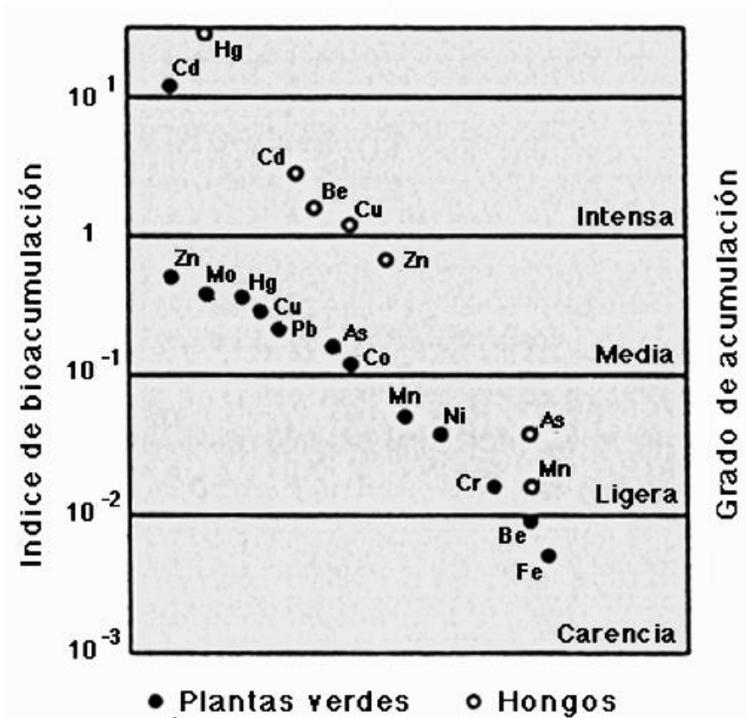


Figura 2. 2. Índices de bioacumulación (IBA) de diversos elementos traza en plantas verdes y hongos. El IBA fue calculado como la relación de elementos traza contenidos en plantas y hongos, respecto a la concentración en los suelos. Fuente: Kabata Pedias, A. (2000). *Elementos traza en suelos y plantas*. Editor CRC Press. Boca Ratón, EE. UU

Esta biodisponibilidad va asociada a la concentración de cada uno de estos metales en el suelo y al tipo de planta, pero en general se muestra la tendencia de estos metales presentes en suelo a bioacumularse en plantas (Sauerbeck, 1991; Intawongse y Dean, 2006). Mucho se ha escrito acerca de la absorción vegetal de los elementos vestigio, resumiendo:

- Usualmente se lleva a cabo en soluciones de baja concentración.
- La tasa de absorción depende fuertemente del pH y de otros iones.
- La intensidad de la absorción varía con las especies vegetales y con el estado de desarrollo.
- Los procesos son sensibles a algunas propiedades del medio ambiente del suelo, como la temperatura, aireación y potencial redox.
- Puede ser selectiva para un ion en particular.
- La absorción acumulación de algunos iones en las plantas, puede presentarse contra un gradiente de concentración.
- Las micorrizas juegan un papel muy importante entre la transferencia de iones del medio externo y las raíces.

La absorción por las raíces es el principal camino de los elementos traza para las plantas; ésta absorción, puede ser tanto pasiva (no metabólica) como activa (metabólica).

- I. Absorción pasiva: se da por difusión de los iones de una solución externa hacia la endodermis de la raíz. El concepto de "espacio libre", se refiere a la absorción de electrolitos por los tejidos de las plantas vivientes, donde las células no están protegidas por una cutícula relativamente impermeable o estructuras endodermales, muestra dos fases, hay una rápida absorción inicial, la cual no es metabólicamente dependiente, y una más prolongada, lenta y una gran absorción en la cual existe acumulación contra un gradiente de concentración y es metabólicamente dependiente (Mengel y Kirby, 1987).
  
- II. Absorción selectiva: la absorción de los nutrimentos, es un proceso estrictamente controlado por el metabolismo de las plantas. Las membranas de las células de las raíces, sin embargo, son más o menos impermeables para la absorción de éstos. La absorción efectuada a través de acarreadores presenta dos ventajas muy importantes para las plantas:

- a. Los nutrientes esenciales para las plantas, son seleccionados de los espacios libres, mientras que los elementos menos usuales y tóxicos son excluidos. Esto es posible que se lleve a cabo, debido a la alta selectividad de las interacciones químicas entre el nutriente y el acarreador respectivo.
  - b. El número de sitios de absorción pueden incrementarse o disminuirse, de acuerdo al exceso, o bien, a la escasez de un elemento específico. Sin embargo, la capacidad de absorción selectiva de nutrientes en las plantas se ve limitada.
- III. Absorción radicular: las raíces exhiben gran actividad en la movilización de elementos traza que son ligados a varios constituyentes del suelo; sin embargo, las raíces actúan también como barrera al movimiento de metales pesados tóxicos a través del sistema planta-suelo. La habilidad de diferentes plantas para absorber los elementos vestigio varía considerablemente, dependiendo de la especie, época, estado de desarrollo, así como de la forma química y solubilidad del elemento vestigio en el suelo. Los horizontes del suelo difieren en su disponibilidad de nutrientes, sin embargo, la capacidad de las plantas para tomar nutrientes depende de la distribución de sus raíces sobre las capas respectivas.

#### **2.4. COMPONENTES DE LAS BATERÍAS**

En términos generales, las baterías, al ser desechadas en la basura o en cualquier sitio, al paso del tiempo, se oxidan por el efecto del proceso de descomposición de sus elementos y de la materia orgánica que las circunda, lo cual provoca daños a la carcasa o envoltura y, por consiguiente, la liberación al ambiente de sus componentes tóxicos a los suelos cercanos y a los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. En los párrafos siguientes, se presentará información sobre cada contaminante contenido en las pilas y baterías, esta información fue tomada principalmente de la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), la cual forma parte del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EUA.

- I. Cadmio: las baterías de Ni–Cd se empezaron a usar a partir de la segunda mitad de la década de los 60, en aparatos portátiles como en rasuradoras recargables, aspiradoras y en cualquier otro aparato doméstico. Su uso generalizado se da a partir de 1996 en la telefonía celular hasta el 2002 en que han sido sustituidas por otras tecnologías más eficientes, sin embargo, aún son ampliamente usadas en herramientas y teléfonos inalámbricos domésticos. Generalmente estas baterías cuentan con un recubrimiento fuerte de plástico que durante varios años puede impedir la liberación de los metales tóxicos, sin embargo, los incendios en basureros o la quema de baterías es un riesgo importante para que el Cd y el Ni sean liberados al ambiente.
- II. Litio: considerando que la tecnología de baterías Ión-Li es la más eficiente disponible en el mercado, se espera un aumento relativamente alto (en caso de no iniciar programas de recolección-reciclado) en el ambiente, de este elemento y sus compuestos.
- III. Manganeso: el dióxido de manganeso está contenido en pilas alcalinas en proporción del 22% y en pilas C-Zn del 29% aproximadamente.
- IV. Mercurio: la liberación del mercurio contenido en pilas, ha ocurrido a consecuencia del uso de tres tipos de pilas: las de óxido de mercurio, las de C-Zn y alcalinas. En el primer tipo mencionado, el contenido de dicho metal es del 33%, para el segundo y tercer tipo de pilas se sabe que durante varias décadas antes de los 90, se les agregaba mercurio (entre 0.5 a 1.2 %) para optimizar su funcionamiento, siendo las alcalinas las de mayor contenido.
- V. Níquel: las aportaciones de Níquel al ambiente corresponden al uso de baterías de nueva tecnología de Ni–Cd y Ni–MH que aparecieron en el mercado a finales de la década de los 90.
- VI. Plomo: este metal se encuentra sobre todo en las baterías utilizadas en los automóviles y de uso industrial y doméstico. Otro riesgo importante para la salud y el ambiente,

lo representa el uso de baterías para respaldar corriente en computadoras, cuyo mercado es relativamente nuevo y ascendente ya que no existen programas de recolección debidamente establecidos, lo cual posibilita que se maneje este tipo de baterías sin las debidas precauciones.

Según Ramírez (2003), las pilas y baterías basándose en su duración y el tipo de manejo requerido, pueden agruparse en: primarias y secundarias. Una pila primaria produce energía eléctrica consumiendo los componentes químicos que contiene, estos ya no pueden recuperarse por lo que las pilas primarias son desechables; cuando estas se agotan, la pila ya no produce más energía y debe ser reemplazada. Dentro de éstas se encuentran las pilas de: Carbono-Zinc, Dióxido de Zinc-Manganeso, Dióxido de Manganeso-Magnesio, Oxido de Mercurio-Zinc, Oxido de Plata-Zinc, Litio y Zinc-Aire.

Las pilas secundarias, o pilas de almacenamiento, obtienen su energía transformando alguno de sus químicos en otro tipo de químicos; cuando el cambio es total, la pila ya no produce más energía, sin embargo, esta puede ser recargada mandando una corriente eléctrica de otra fuente a través de ella para así poder volver a los químicos a su estado original. Dentro de estas se encuentran las pilas de: Níquel-Cadmio, Acumuladores Ácidos de Plomo y Níquel-Hidruro de Metal.

Tabla 2. 1. Componente de las pilas primarias desechables.

<b>Tipos de pilas</b>	<b>Componentes</b>	<b>Usos</b>	<b>Tipos de pilas</b>	<b>Componentes</b>	<b>Usos</b>
<b>Carbono-Zinc</b>	Cadmio 0.08 % Carbono 7% Cloruro de Amonio Cloruro de Zinc Dióxido de Manganeso 29% Mercurio 0.01 % Plástico y lámina 26 % Zinc 17 %	Linternas, radios, juguetes y toca casetes.	<b>Zinc-Aire</b>	Cloruro de Sodio o Hidróxido de Sodio Mercurio 1 % Oxígeno (del aire) Plástico y lámina 67 % Plata 1 % Zinc 30 %	Aparatos para sordera, marcapasos y equipos fotográficos.
<b>Alcalinas</b>	Carbono 2 % Dióxido de Manganeso 22 % Hidróxido de Potasio Mercurio 0.5 – 1 % Plástico y lámina 42 % Zinc 14 %	Juguetes, tocacintas, cámaras fotográficas y grabadoras.	<b>Oxido de Plata</b>	Cloruro de Sodio o Hidróxido de Sodio Mercurio 1 % Óxido de Plata 27 % Plástico y lámina 29 % Zinc 10 %	Aparatos para sordera, calculadoras y relojes.
<b>Oxido de Mercurio</b>	Hidróxido de Potasio o Hidróxido de Sodio Mercurio 33 % Zinc 11 % Plástico y lámina 29 %	Aparatos para sordera, calculadoras, relojes e instrumentos de precisión.	<b>Litio</b>	Dióxido de Manganeso Litio 10-30 % Plástico y lámina 29 %	Equipos de comunicación, radios portátiles, transmisores, instrumentos médicos, computadoras, celulares, calculadoras, cámaras fotográficas y agendas electrónicas.

Fuente: Arias, M. L. y Díaz, J. (2004). *Contaminación por Pilas y Baterías en México*. Instituto Nacional de Ecología, México.

Tabla 2. 2. Componente de las pilas secundarias recargables.

<b>Tipos de pilas</b>	<b>Componentes principales</b>	<b>Usos</b>
<b>Níquel-Cadmio</b>	Cd 18 % Ni 20 % Hidróxido de Potasio o de Sodio	Juguetes, lámparas, artículos electrónicos y equipo electrónico portátil.
<b>Níquel-Hidruro de Metal</b>	Ni 25 % Hidróxido de Potasio	Productos electrónicos portátiles.
<b>Ion Litio</b>	Carbono altamente cristalizado (ánodo) Óxido de Litio-Cobalto (cátodo) Solvente orgánico (electrolito)	Telefonía celular, computadoras, cámaras fotográficas y de video.
<b>Plomo</b>	Ácido sulfúrico Plomo	Uso automotriz, industrial y doméstico.

Fuente: Arias, M. L. y Díaz, J. (2004). *Contaminación por Pilas y Baterías en México*. Instituto Nacional de Ecología, México.

## **2.5. ESTADÍSTICAS DE LAS PILAS Y BATERIAS PARA EL SALVADOR**

Para tener una idea de la cantidad de pilas y baterías que se encuentran actualmente en el territorio salvadoreño fue necesario identificar el volumen de baterías que ingresan a El Salvador, el cual, se determinó a través del Banco Central de la Reserva. Se debe tener en cuenta que no se posee información sobre las baterías que ya vienen incluidas en los aparatos eléctricos cuando se compran, ya sean baterías primarias o secundarias, tampoco se consideraran las pilas de botón usadas en relojes de pulso que se importan dentro de los artefactos.

La búsqueda en los registros del Banco Central de la Reserva se realiza por medio del código arancelario, para ello es necesario consultar la Dirección General de Aduanas y a través del Sistema Arancelario Centroamericano (SAC) para obtener dichos códigos. Para el caso de las pilas y baterías los códigos y las correspondientes descripciones en el Sistema Arancelario Centroamericano son:

Tabla 2. 3. Descripción según partida arancelaria de las pilas y baterías eléctricas.

<b>Código</b>	<b>Sub Partida</b>	<b>Descripción</b>
<b>85061010</b>	De dióxido de manganeso.	Pilas cilíndricas secas de 15 V, de volumen exterior inferior o igual a 300 cm <sup>3</sup> y peso unitario inferior o igual a 100 g.
<b>85061020</b>		Pilas rectangulares de 15 V, 6 V o 9 V, de volumen exterior inferior o igual a 300 cm <sup>3</sup> y peso unitario inferior o igual a 1,200 g.
<b>85061090</b>		Otras.
<b>85063000</b>	De óxido de mercurio.	De óxido de mercurio.
<b>85064000</b>	De óxido de plata.	De óxido de plata.
<b>85065000</b>	De litio.	De litio.
<b>85066000</b>	De aire-cinc.	De aire-cinc.
<b>85068000</b>	Las demás pilas y baterías de pilas.	Las demás pilas y baterías de pilas.
<b>85069000</b>	Partes.	Partes.

Fuente: Dirección General de Aduana de El Salvador (2016). *Sistema Arancelario*. San Bartolo, Ilopango.

Cómo se puede observar en la Tabla 2.3 la clasificación que se hace de las pilas y baterías en el SAC es muy escueta, existen partidas que llevan por descripción “las demás” o “partes”; según estas partidas pueden ingresar al país pilas y baterías con cualquier sistema químico sin que el importador tenga la obligación de especificarlo, no hay forma de determinar cuáles son los sistemas químicos que ingresan bajo esa descripción. En la Tabla 2.4 se presenta un resumen de los volúmenes de importación de pilas y baterías para El Salvador desde el año 2010 hasta el 2015.

Tabla 2. 4. Resumen de volúmenes de importaciones hacia El Salvador de pilas y baterías eléctricas de 2010 a 2015.

Código Arancelario	Sub Partida	Volumen de importación en kilogramos y porcentaje					
		2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>85061010</b>	<b>De dióxido de manganeso.</b>	1,597,852.19 95.7727 %	967,298.21 94.9768 %	894,180.77 91.8881 %	952,177.67 87.4499 %	828,613.07 88.8677 %	770,230.75 90.1394 %
<b>85061020</b>		25,662.82 1.5382 %	17,436.80 1.7121 %	24,526.03 2.5204 %	68,027.22 6.2478 %	36,987.14 3.9668 %	31,527.70 3.6897 %
<b>85061090</b>		11,170.96 0.6696 %	8,227.73 0.8079 %	11,899.32 1.2228 %	16,022.37 1.4715 %	18,352.91 1.9683 %	14,017.53 1.6405 %
<b>85063000</b>	<b>De óxido de mercurio.</b>	78.03 0.0047 %	192.43 0.0189 %	313.52 0.0322 %	228.98 0.0210 %	175.57 0.0188 %	88.01 0.0103 %
<b>85064000</b>	<b>De óxido de plata.</b>	1,268.63 0.0760 %	401.13 0.0394 %	1,012.63 0.1041 %	1,037.46 0.0953 %	1,140.11 0.1223 %	1,168.44 0.1367 %
<b>85065000</b>	<b>De litio.</b>	8,363.37 0.5013 %	14,715.16 1.4448 %	30,609.75 3.1455 %	34,340.44 3.1539 %	37,097.40 3.9786 %	23,822.07 2.7879 %
<b>85066000</b>	<b>De aire-cinc.</b>	3,271.62 0.1961 %	1,611.95 0.1583 %	422.85 0.0435 %	2,549.07 0.2341 %	3,058.65 0.3280 %	402.12 0.0471 %
<b>85068000</b>	<b>Las demás pilas y baterías de pilas.</b>	20,620.31 1.2359 %	8,437.13 0.8284 %	9,978.79 1.0254 %	14,310.19 1.3143 %	6,955.12 0.7459 %	13,231.76 1.5485 %
<b>85069000</b>	<b>Partes.</b>	91.27 0.0055 %	137.27 0.0135 %	175.92 0.0181 %	133.46 0.0123 %	32.5 0.0035 %	0 0.0000 %
<b>Totales</b>		<b>1,668,379.20</b>	<b>1,018,457.81</b>	<b>973,119.58</b>	<b>1,088,826.86</b>	<b>932,412.47</b>	<b>854,488.38</b>

Fuente: Banco Central de la Reserva (2016). *Base de Datos del Comercio Exterior*. San Salvador, El Salvador.

## **2.6. DISPOSICIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS EN EL SALVADOR**

Desde años atrás, las municipalidades han experimentado la problemática relacionada a los desechos sólidos, la cual, con el paso del tiempo se ha vuelto cada vez más compleja, a tal grado que se ha visto la necesidad de abordarlo bajo la lógica de un enfoque multidisciplinario, que incorpore elementos económicos, sociales y ambientales, para que su mitigación sea factible.

Según el Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos (2000), se define desechos sólidos como aquellos materiales no peligrosos que son descartados por la actividad del ser humano o generados por la naturaleza, y que, no teniendo una utilidad inmediata para su actual poseedor, se transforman en indeseable. En este reglamento, se establecen los lineamientos base en relación al manejo integral de los desechos sólidos municipales, como lo son, el almacenamiento, la recolección y transporte, las estaciones de transferencia, el tratamiento y aprovechamiento, la disposición final, infracciones y sanciones, entre otros lineamientos.

En términos de disposición final, se adopta el relleno sanitario como un método de disposición final de desechos sólidos aceptables, sin descartar la utilización de otras tecnologías ambientes apropiadas. La ubicación de los terrenos utilizados como sitios de disposición final deberá cumplir como mínimo, las características siguientes:

- I. Estar ubicadas a una distancia que garantice que las zonas de recarga de acuíferos o de fuentes de abastecimiento de agua potable, estén libres de contaminación. Esta distancia será fijada dentro de las normas técnicas nacionales.
  
- II. Que el suelo reúna características de impermeabilidad, aceptándose un coeficiente máximo permisible de infiltración  $10^{-7}$  cm/s; que posea características adecuadas de remoción de contaminantes; y que la profundidad de nivel de las aguas subterráneas garantice la conservación de los acuíferos existentes en la zona. En caso de que se carezca de este tipo de suelos, se podrá trabajar con un mayor espesor de la capa, para lograr el mismo nivel de impermeabilidad.

- III. Contar con suficiente material terreo para la cobertura diaria de los desechos sólidos depositados durante la vida útil.
- IV. Estar ubicado a una distancia no perjudicial para las zonas de inundación, pantanos, marismas, cuerpos de agua y zonas de drenaje natural.
- V. Estar ubicado a una distancia de 500 metros de los núcleos poblacionales y con su fácil acceso por carretera o camino transitable en cualquier época del año.
- VI. Estar ubicado fuera de las áreas naturales protegidas o de los ecosistemas frágiles, así como de las servidumbres de paso de acueductos, canales de riego, alcantarillados y líneas de conducción de energía eléctrica.
- VII. Estar ubicados a una distancia mínima de 60 metros de fallas que hayan tenido desplazamientos recientes.

El reglamento especial sobre manejo integral de los desechos sólidos, también hace referencia a la clasificación de los rellenos sanitarios, en base a su forma de operación, estos se clasifican en tres:

- I. Relleno Sanitario Manual: se utilizará preferentemente como método de disposición final de los desechos sólidos ordinarios de poblaciones urbanas y rurales, para aquellas localidades que generen menos de 20 toneladas diarias de desechos. (Art 15. Reglamento especial sobre el manejo integral de los desechos sólidos). Para la existencia de un relleno sanitario manual, serán considerados los siguientes requisitos mínimos, adicionalmente a aquellos establecidos en el Art. 35:
  - a. Una vida útil superior a los cinco años.
  - b. Un equipo mínimo para el movimiento y la compactación manual de los desechos, incluyendo un equipo de protección personal.
  - c. La disposición de desechos en capas de 20 a 30 cms.

- d. El diseño del relleno, el cual será parte de un proyecto integral de la gestión de desechos sólidos.
- II. Relleno Sanitario Mecanizado: se utilizará preferentemente como método de disposición final de los desechos sólidos ordinarios de poblaciones urbanas, en las que se generen más de 40 toneladas diarias de desechos. Dicho relleno sanitario podrá utilizarse como tipo de disposición final para varias localidades. (Art 16. Reglamento especial sobre el manejo integral de los desechos sólidos). Para la existencia de un relleno sanitario mecanizado, serán considerados los siguientes requisitos mínimos, adicionalmente a aquellos establecidos en el Art. 35:
- a. Una vida útil superior a los 10 años.
  - b. Los taludes finales deberán tener una inclinación no mayor de 30%.
  - c. Un área de ingreso con báscula, caseta de control y estacionamiento.
  - d. Un área administrativa y otra de oficinas.
  - e. Servicio de electricidad, agua y teléfono, en el área administrativa y de ingreso.
  - f. Acondicionamiento del terreno, con una base de suelo impermeable, con un coeficiente de máximo permisible de infiltración no superior 10<sup>-7</sup> cm/s, de un espesor mínimo de 50 cms y compactación al 95%, y con pendiente mínima del 3%, hacia las líneas de los tubos de drenaje.
  - g. Un sistema de drenaje para lixiviados, que cuente con aditamentos para su inspección y su mantenimiento, el que conducirá a estos líquidos hasta un sistema de tratamiento y disposición final, con o sin recirculación en el relleno.
  - h. Un control de la calidad del agua subterránea, mediante la perforación de los pozos que sean necesarios, para detectar la posible presencia de contaminación por la operación del relleno.
  - i. Minimización de la emisión de cualquier material volátil.
  - j. Una supervisión calificada, de carácter permanente.
  - k. Una disposición de los desechos, en capas de 60 cms. de espesor.
  - l. Una compactación de cada capa, mediante un mínimo de cuatro pasadas con maquinaria de peso mínimo de 15 toneladas.

- m. Un sistema de emisión para gases, con aprovechamiento o evaluación permanente.
- n. Una asignación de personal que sea suficiente para el volumen de desechos que se dispondrán.
- o. Un reglamento interno de operación.

III. Relleno Sanitario Combinado o Mixto: en aquellas poblaciones urbanas y rurales, en las que se generen de 20 a 40 toneladas diarias de desechos sólidos ordinarios, podrá usarse preferentemente cualesquiera de los dos tipos de relleno sanitario, o una combinación de ambos, según lo requieran las condiciones financieras y ambientales de cada caso. (Art 17. Reglamento especial sobre el manejo integral de los desechos sólidos)

De acuerdo a los datos recolectados en el segundo censo nacional de desechos sólidos municipales realizado en diciembre 2006, se tiene que 210 municipios del país poseen servicio de recolección y transporte de desechos sólidos, de éstos, solamente el 19% de los municipios realizan su disposición final en un relleno sanitario, 168 municipios disponen sus desechos en botaderos municipales a cielo abierto y tres municipios poseen una compostera-botadero (véase Tabla 2.5).

Para dicho año la tendencia a la utilización de botaderos como sitios de disposición final es alta comparada con el uso de rellenos sanitarios. De los 52 municipios que no prestan el servicio de recolección y transporte de desechos sólidos, 19 municipios reportan un botadero clandestino que es utilizado por los habitantes de cada localidad para disponer de sus desechos (véase Tabla 2.6).

Las consecuencias sanitarias, escénicas y ambientales que persisten hoy en día en el manejo de los desechos, han obligado a erradicar los botaderos a cielo abierto y a buscar alternativas ambientalmente adecuadas para la disposición final de los desechos, así como a considerar opciones que optimicen las actividades de recolección-transporte y tratamientos alternativos.

Tabla 2. 5. Cantidad de municipios que disponen sus desechos en rellenos sanitarios, botaderos municipales o composteras y botadero (Diciembre, 2006).

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje %</b>
Municipios con disposición final en relleno sanitario	39	19
Municipios que disponen en botaderos municipales	168	80
Municipios que disponen en composteras-botaderos	3	1
<b>Subtotal municipios con recolección y transporte de desechos</b>	<b>210</b>	<b>100</b>

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales*. San Salvador, El Salvador.

Tabla 2. 6. Cantidad de municipios sin recolección y transporte que reportan botaderos clandestinos.

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje %</b>
Municipios que no poseen servicios de recolección y transporte de desechos sólidos, pero existen botaderos clandestinos	19	27

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales*. San Salvador, El Salvador.

De esta manera, la gestión integral está fundamentada en un esquema ideal que es el punto de partida para la formulación y diseño de planes municipales orientados a brindar un servicio de aseo que pretenda conservar la calidad de vida de sus habitantes.

Para el año 2009, la generación de estos desechos sólidos a nivel nacional fue de 3,434 Ton/día con una recolección de 2,563 Ton/día, generando así una cobertura de recolección del 75%. En términos departamentales, para el mismo año, los poseedores de la mayor generación de desechos sólidos son San Salvador con 53,537 Ton/mes, después le sigue La Libertad con 12,144 Ton/mes y como tercero Santa Ana con 8,416 Ton/mes (véase Tabla 2.7).

Tabla 2. 7. Generación de desechos sólidos a nivel departamental en 2009.

<b>No.</b>	<b>Departamento</b>	<b>Generación (Ton/mes)</b>	<b>Recolección (Ton/mes)</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Población servida</b>	<b>Viviendas servidas</b>
<b>1</b>	Ahuachapán	1,960	1,580	84%	113,086	27,130
<b>2</b>	Santa Ana	8,416	7,440	76%	249,190	64,638
<b>3</b>	Sonsonate	3,596	3,270	91%	237,034	56,989
<b>4</b>	Chalatenango	1,823	1,590	85%	53,935	13,195
<b>5</b>	La Libertad	12,144	9,810	89%	411,152	103,775
<b>6</b>	Cabañas	1,502	1,230	84%	41,121	9,505
<b>7</b>	La Paz	2,000	1,680	81%	122,907	30,289
<b>8</b>	Cuscatlán	2,471	1,530	78%	74,887	17,400
<b>9</b>	San Salvador	53,537	37,350	69%	1,006,627	262,673
<b>10</b>	San Vicente	1,183	1,060	82%	62,835	15,143
<b>11</b>	Usulután	3,445	2,710	79%	129,610	32,616
<b>12</b>	San Miguel	7,742	5,362	68%	147,584	37,654
<b>13</b>	Morazán	1,186	897	76%	34,620	8,264
<b>14</b>	La Unión	2,004	1,370	75%	54,201	13,601

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). *Estadísticas*. San Salvador, El Salvador.

En mayo del 2010, el Ministerio de Medio Ambiente presentó el plan para el mejoramiento del manejo de desechos sólidos en El Salvador; este tiene como objetivo el mejorar la disposición final, reducir los costos a los municipios a través de la ampliación de la oferta de tratamiento o disposición final de los desechos sólidos, garantizando la sostenibilidad de los sistemas a través de la conciliación de los intereses económicos y sanitario-ambientales, además de ello, la creación de mecanismos de regulación e implementación de programa educativos y 3R (Reducción, Reutilización y Reciclaje de desechos sólidos). Una de las principales bases es la ampliación de la oferta de tratamiento y disposición final en los centros de compostaje y reciclaje, y en los rellenos sanitarios.

En los años 2014 y 2015, el Ministerio de Medio Ambiente apoyó al mejoramiento del manejo de desechos sólidos en El Salvador, se suscribieron cuatro convenios de cooperación para la implementación del proyecto con las asociaciones municipales:

- I. Asociación Intermunicipal del Norte de La Unión (ASINORLU).
- II. Asociación Ecológica de los Municipios de Santa Ana (ASEMUSA).
- III. Asociación de Municipios de la Sierra Tecapa-Chinameca (ASITECHI).
- IV. Asociación de municipales de Los Nonualcos.

Estos convenios permitirán iniciar estudios básicos para el mejoramiento de manejo de desechos sólidos, incluyendo el fortalecimiento técnico, compra de equipo e infraestructura.

### **2.6.1. COMPOSICIÓN DE LOS DESECHOS SÓLIDOS**

La composición de los desechos sólidos en el país es muy variable, cambia de municipio a municipio, de un departamento a otro, es más, es diferente entre las colonias de un mismo municipio. Para El Salvador, la caracterización de los desechos sólidos captados en las zonas urbanas ha presentado, entre el 67 % y el 75 % de materias orgánicas, mientras que para metales son el 1 % a 2 % (véase Figura 2.3). Actualmente, por la situación económica, se ha incrementado la recuperación y el aprovechamiento de los plásticos y metales, para ello han surgido nuevas empresas acopiadoras y recicladoras (véase Figura 2.4).

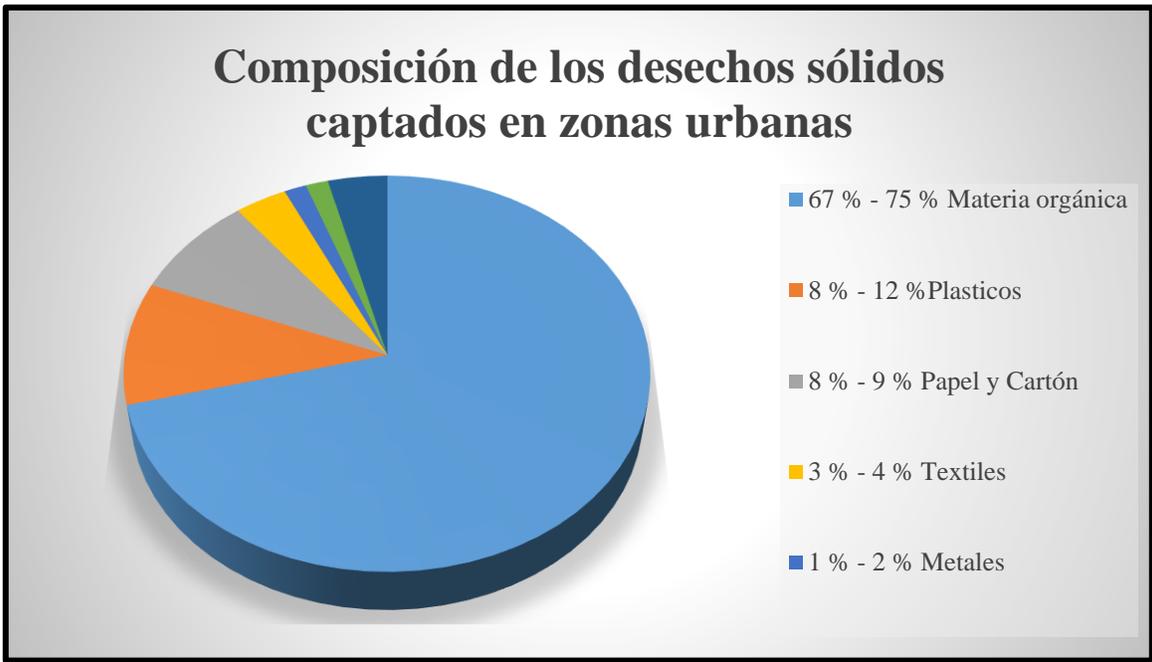


Figura 2. 3. Composición de los desechos sólidos captados en zonas urbanas. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo para los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)*. San Salvador, El Salvador.

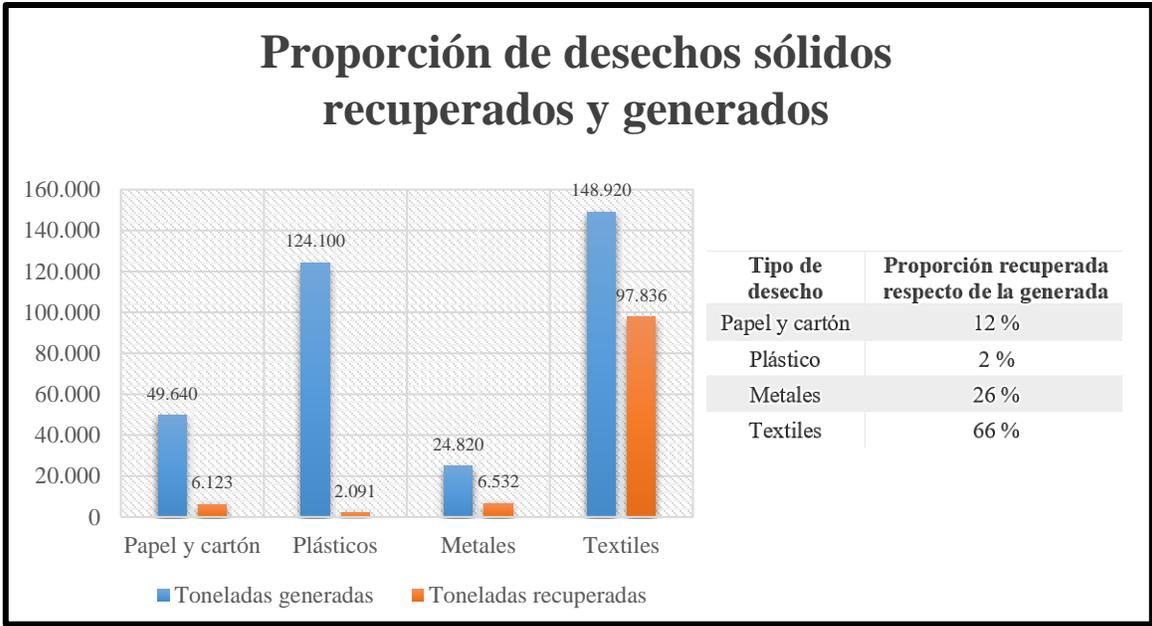


Figura 2. 4. Proporción de desechos sólidos recuperados y generados. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo para los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)*. San Salvador, El Salvador.

## 2.6.2. RELLENOS SANITARIOS EN EL SALVADOR

Para el año 2006, a través del segundo censo nacional de desechos sólidos municipales se identificaron 11 rellenos sanitarios en el país, la mayor parte de ellos son de poca capacidad, uno de ellos no se encontraba en operación y otro operaba como un botadero controlado.

Tabla 2. 8. Rellenos sanitarios existentes en el país para el año 2006.

<b>Rellenos Sanitarios en El Salvador</b>	
<b>Departamento</b>	<b>Municipio</b>
San Salvador	Nejapa
Cuscatlán	Suchitoto
Usulután	Usulután
Ahuachapán	Atiquizaya y San Francisco Menéndez
Sonsonate	Sonsonate
Morazán	Perquín, Corinto y Jocoatique
La Unión	Asigolfo y Pasaquina

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales*. San Salvador, El Salvador.

De las 2,451.59 Ton/día que son recolectadas en el año 2006, aproximadamente un 64% equivalente a 1,575.41 Toneladas son dispuestas en un relleno sanitario, tal como se detalla en la Tabla 2.9; las restantes 876.18 Ton/día son dispuestas en un botadero.

Se reportaban para el mismo año 118 botaderos municipales y 23 clandestinos, en algunos casos un botadero suele ser utilizado por varias municipalidades, así como también algunas municipalidades que no poseen servicio de recolección reportan más de un botadero clandestino.

Tabla 2. 9. Cantidad de desechos sólidos que son dispuestas en rellenos sanitarios para el año 2006.

<b>Nombre del Relleno Sanitario</b>	<b>Municipios que lo utilizan</b>	<b>Cantidad de desechos que reciben (Ton/día)</b>
MIDES	Apopa-Ayutuxtepeque-San Salvador-San Martin-San Marcos-Panchimalco-Nejapa-Mejicanos-Ciudad Delgado-Cuscatancingo-Cojutepeque-Zaragoza-San José Villanueva-Nueva San Salvador-Nuevo Cuscatlán-Huizucar-Ciudad Arce-El Paisnal-Quezaltepeque-Olocuilta-Ilopango-Soyapango	1,388.65
Sonsonate	Antiguo Cuscatlán-Sonsonate	120.36
Usulután	Santa María-Puerto El Triunfo-Jucuaran-Jiquilisco-Ereguayquin-Usulután-Concepción Batres	47.88
Atiquizaya	Atiquizaya-San Lorenzo	6.98
San Francisco Menéndez	San Francisco Menéndez	5.56
Suchitoto	Suchitoto	3.14
Corinto	Corinto	2.00
Meanguera	Jocoatique-Meanguera	0.53
Relleno Sanitario de Perquín	Perquín	0.31
<b>Cantidad total de desechos dispuestos en relleno sanitario</b>		<b>1,575.41</b>

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales*. San Salvador, El Salvador.

Según las estadísticas presentadas por el Ministerio de Medio Ambiente, en la evolución registrada del uso de rellenos sanitarios en el país desde 1998 hasta 2009, se refleja un incremento significativo para los años desde 2006 a 2009 en relación al porcentaje de municipios atendidos por rellenos sanitarios.

Tabla 2. 10. Evolución del uso de rellenos sanitarios en el país, desde 1998 hasta 2009.

Aspecto	Años			
	1998 <sup>a</sup>	2001 <sup>b</sup>	2006 <sup>c</sup>	2009 <sup>d</sup>
<b>Total de rellenos sanitarios</b>	0	1	9	14
<b>Total de municipios atendidos con rellenos sanitarios</b>	0	11	39	252
<b>Porcentaje de municipios atendidos por rellenos sanitarios (%)</b>	0	4%	12%	96%
<b>Cobertura de disposición sanitaria (%)</b>	0	46%	48%	75%
<b>Total de población urbana atendida con rellenos sanitarios (millones de habitantes)</b>	0	1.3	1.9	3.6
<b>Porcentaje de población urbana atendida por rellenos sanitarios (%)</b>	0	35%	54%	99%

Fuente: a. Análisis sectorial de los desechos sólidos en El Salvador. OPS, MSPAS, 1998. b. Primer Censo Nacional de Desechos Sólidos de El Salvador, 2001, estudio regional del manejo de os desechos sólidos en el área metropolitana de San Salvador, JICA, 2000. c. Segundo Censo nacional de desechos sólidos de El Salvador, 2006. d. Datos estadísticos de la unidad de desechos sólidos, 2009.

En el año 2010, se recolectaban y depositaban en los rellenos sanitarios 2,563 toneladas por día, lo que equivale a una cobertura de 75% tanto de recolección como disposición final sanitariamente adecuada. Los desechos sólidos son dispuestos en 14 rellenos sanitarios, de los cuales solamente cinco tienen capacidad para recibir cantidades mayores a 20 toneladas diarias.

Tabla 2. 11. Capacidad de recepción de los rellenos sanitarios, para el 2010.

No.	Ubicación del relleno sanitario	Recepción anual Ton/día
1	Nejapa	2,000
2	Sonsonate	500
3	San Miguel	250
4	Usulután	200
5	Santa Rosa de Lima	80

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Plan para el Mejoramiento del Manejo de Desechos Sólidos en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.

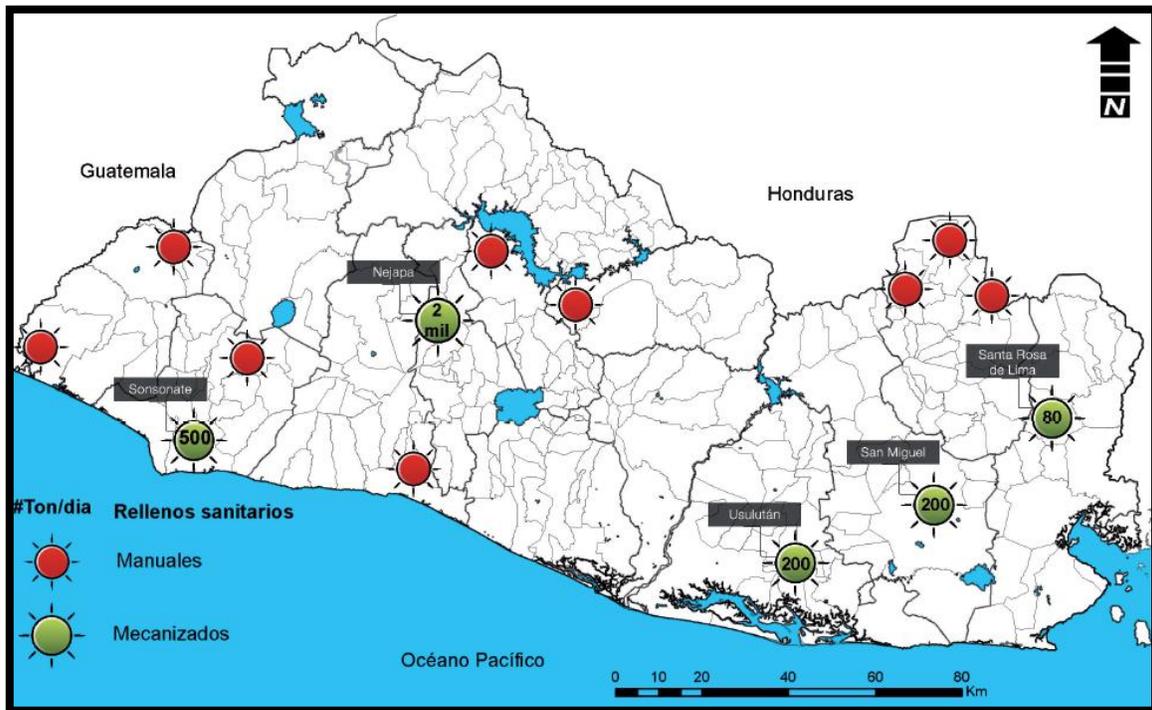


Figura 2. 5. Ubicación geográfica de los rellenos sanitarios existentes en el país, para el año 2010. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Plan para el Mejoramiento del Manejo de Desechos Sólidos en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.

Para ese mismo año, la limitada oferta de disposición final adecuada, había generado la concentración de los mismos, provocando costos insostenibles de transporte y manejo final, además de la proliferación de puntos de transferencia ilegales que operan en condiciones precarias e insalubres. Los elevados costos de transporte y disposición final, generaron disminución en la cobertura y frecuencia del servicio de recolección municipal causando condiciones insalubres en las ciudades.

Asimismo, la ausencia de mecanismos que regulen la calidad de los servicios y sus costos, tomando en cuenta la economía de escala de este tipo de servicios, provocaron cobros excesivos y el endeudamiento de las municipalidades. Por lo cual, en el programa nacional para el manejo integral de los desechos sólidos en El Salvador del 2010, se presenta una aplicación tanto de la oferta de tratamiento como de la disposición final.

En relación a la ampliación de rellenos sanitarios se contempla la construcción de seis nuevos rellenos sanitarios, en los departamentos de Ahuachapán, Santa Ana, Chalatenango, San

Vicente, Morazán y La Unión; además de ello, la ampliación de tres rellenos sanitarios existentes en los municipios de Puerto de La Libertad, Santa Rosa de Lima y San Miguel. Los rellenos sanitarios tendrán su infraestructura completa, consistente en impermeabilización de las celdas, sistemas de conducción y tratamiento de lixiviados, drenaje de gases, aguas lluvias, accesos, cercado perimetral, caseta de operaciones y pesaje e instalaciones sanitarias.

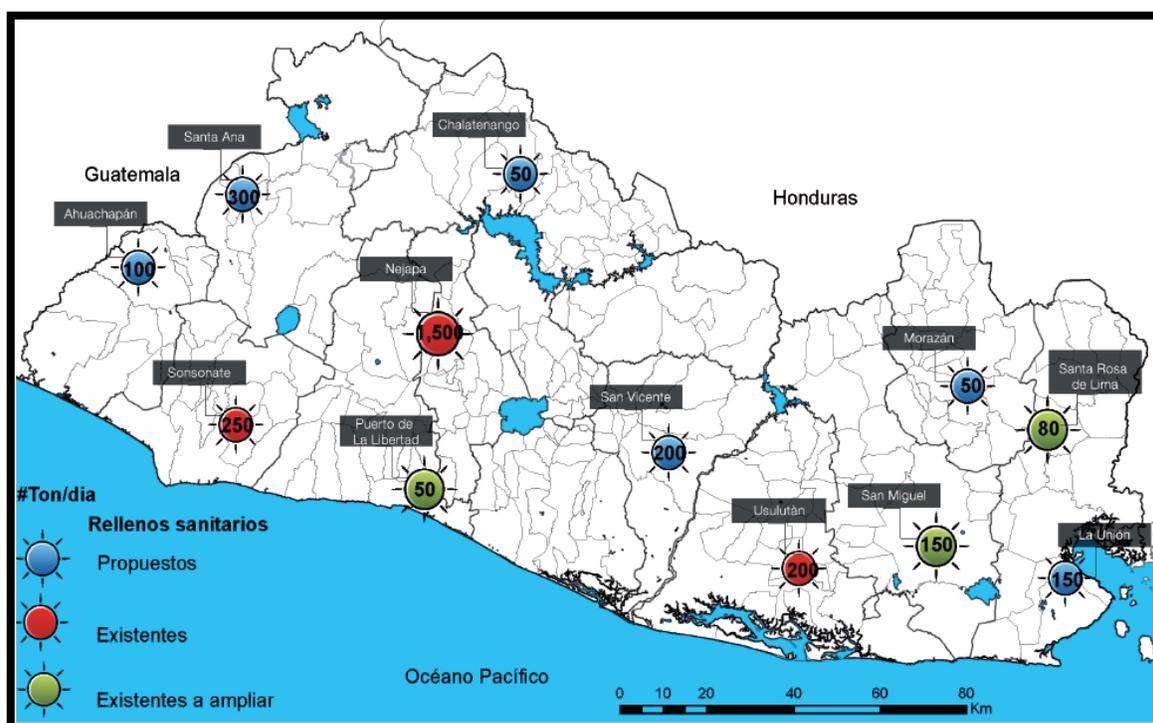


Figura 2. 6. Oferta ampliada de disposición final para el año 2010. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Plan para el Mejoramiento del Manejo de Desechos Sólidos en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.

Según los últimos datos actualizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, como resultado de todos los planes e iniciativas para evitar la contaminación ambiental por los desechos sólidos, para el año 2014 se contaban con 17 rellenos sanitarios de los cuales nueve son rellenos sanitarios manuales (véase Tabla 2.12) y ocho son rellenos sanitarios mecanizados (véase Tabla 2.13).

Tabla 2. 12. Rellenos sanitarios manuales en El Salvador para el año 2014.

No	Nombre de Proyecto	Ubicación	Tipo de relleno sanitario	Tipo de administración	Sistema de impermeabilización de celdas	Sistema de tratamiento de lixiviados	Sistema de impermeabilización de tratamiento de lixiviados	Sistema de aireación	Sistema de recirculación
1	Relleno Sanitario de Atiquizaya	Atiquizaya, Ahuachapán	Manual	Directa Municipal	Suelo Cemento	Laguna	Geomembrana	No	-
2	Relleno Sanitario de Cinquera	Cinquera, Cabañas	Manual	Directa Municipal	Arcilla	Lagunas	Concreto	No	-
3	Relleno Sanitario de Corinto, Morazán	Corinto, Morazán	Manual	Directa Municipal	Arcilla	RAFA-Filtro	Concreto	No aplica	NO
4	Relleno Sanitario de Meanguera, Morazán	Meanguera, Morazán	Manual	Directa Municipal	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	No	-
5	Relleno Sanitario de Perquín, Morazán	Perquín, Morazán	Manual	Directa Municipal	Geomembrana	RAFA-Filtro	Concreto	No aplica	NO
6	Compostera y celda de descarte de AMUCHADES	San Antonio Los Ranchos, Chalatenango	Manual	Directa Asociación municipal	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	NO	SI
7	Relleno Sanitario Municipal de San Francisco Menéndez	San Francisco Menéndez, Ahuachapán	Manual	Directa Municipal	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	No	-
8	Relleno Sanitario de Santa Isabel Ishuatán	Santa Isabel Ishuatán, Sonsonate	Manual	Directa Municipal	Arcilla	Fosa y Filtro	Concreto	No aplica	-
9	Relleno Sanitario de Suchitoto	Suchitoto, Cuscatlán	Manual	Directa Municipal	Suelo Cemento	Laguna	Geomembrana	No	-

Fuente: Dirección General de Saneamiento (2016). *Respuesta a solicitud realizada a OIR-MARN*. San Salvador, El Salvador.

Tabla 2. 13. Rellenos sanitarios mecanizados en El Salvador para el año 2014.

No	Nombre de Proyecto	Ubicación	Tipo de relleno sanitario	Tipo de administración	Sistema de impermeabilización de celdas	Sistema de tratamiento de lixiviados	Sistema de impermeabilización de tratamiento de lixiviados	Sistema de aireación	Sistema de recirculación
1	Relleno Sanitario de La Libertad	La Libertad, La Libertad	Mecanizado	Directa Empresa Mixta	Geomembrana	Lagunas	Geomembrana	NO	SI
2	Relleno Sanitario de MIDES SEM, C.V.	Nejapa, San Salvador	Mecanizado	Directa Empresa Mixta	Geomembrana	Lagunas	Geomembrana	SI	SI
3	Relleno Sanitario de ASINORLU	Santa Rosa de Lima, La Unión	Mecanizado	Directa Asociación Municipal	Geomembrana	Laguna/Aireación	Geomembrana	SI	SI
4	Relleno Sanitario de Sonsonate	Sonsonate. Sonsonate	Mecanizado	Terciaria, CAPSA, S. A DE C.V.	Arcilla	Laguna	Geomembrana	NO	SI
5	Relleno Sanitario de Chalatenango	Tejutla, Chalatenango	Mecanizado	Directa Asociación de municipios	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	NO	SI
6	Relleno Sanitario de Santa Ana	Texistepeque, Santa Ana	Mecanizado	Directa Asociación Municipios	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	NO	SI
7	Relleno Sanitario de San Miguel	Uluazapa, San Miguel	Mecanizado	Directa Municipal	Geomembrana	Laguna	Geomembrana	NO	SI
8	Relleno Sanitario de Usulután	Usulután, Usulután	Mecanizado	Directa Empresa Mixta	Suelo Cemento	Laguna	-	NO	SI

Fuente: Dirección General de Saneamiento (2016). *Respuesta a solicitud realizada a OIR-MARN*. San Salvador, El Salvador.

Para el mismo año, la cantidad de toneladas depositadas en los rellenos sanitarios a nivel nacional fue de 1,111,188.21 Toneladas anuales, siendo el mayor receptor el relleno sanitario de MIDES SEM, C.V. con el 60.61%, después el relleno sanitario de Sonsonate con 13.38% y como tercero el relleno sanitario de Usulután con 6.52%.

Tabla 2. 14. Total depositado en los rellenos sanitarios en El Salvador, para el 2014.

No	Relleno Sanitario	Total Depositado (Toneladas)	Promedio Mensual (Toneladas)	Promedio Día (Toneladas)
1	Relleno Sanitario de MIDES SEM, C.V.	673,516.780	56,126.398	1,870.880
2	Relleno Sanitario de Sonsonate	148,721.955	12,393.496	413.117
3	Relleno Sanitario de Usulután	72,542.724	6,045.227	201.508
4	Relleno Sanitario de Santa Ana	70,819.330	5,901.611	196.720
5	Relleno Sanitario de La Libertad	52,458.780	4,371.565	145.719
6	Relleno Sanitario de San Miguel	49,012.395	4,084.366	136.146
7	Relleno Sanitario de ASINORLU	14,228.518	1,185.710	39.524
8	Relleno Sanitario de Chalatenango	11,466.08	955.507	31.85
9	Relleno Sanitario de Atiquizaya	8,445.920	703.827	23.461
10	Relleno Sanitario Municipal de San Francisco Menéndez	4,147.400	345.617	11.521
11	Relleno Sanitario de Corinto, Morazán	2,028.000	169.000	5.633
12	Compostera y celda de descarte de AMUCHADES	1,615.83	134.653	4.49
13	Relleno Sanitario de Suchitoto	1,118.000	93.167	3.106
14	Relleno Sanitario de Cinquera	475.500	39.625	1.321
15	Relleno Sanitario de Meanguera, Morazán	296.000	24.667	0.822
16	Relleno Sanitario de Perquín, Morazán	232.000	19.333	0.644
17	Relleno Sanitario de Santa Isabel Ishuatán	63.000	5.250	0.175
<b>TOTAL</b>		<b>1,111,188.212</b>	<b>92,599.018</b>	<b>3,086.634</b>

Fuente: Dirección General de Saneamiento (2016). *Respuesta a solicitud realizada a OIR-MARN*. San Salvador, El Salvador.

## 2.7. FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL

### I. Fundamento teórico.

Según Beuchaine (2012) los principios de la fluorescencia de rayos X son los siguientes:

- Un cuanto de rayos X golpea un electrón de capa inferior de un átomo (muestra), el electrón se retira dejando el átomo en un estado excitado.
- El electrón de una capa interior faltante se reemplaza por un electrón de una capa exterior.
- La diferencia de energía entre la capa interior y exterior es equilibrada por la emisión de un fotón (radiación de rayos X de fluorescencia).

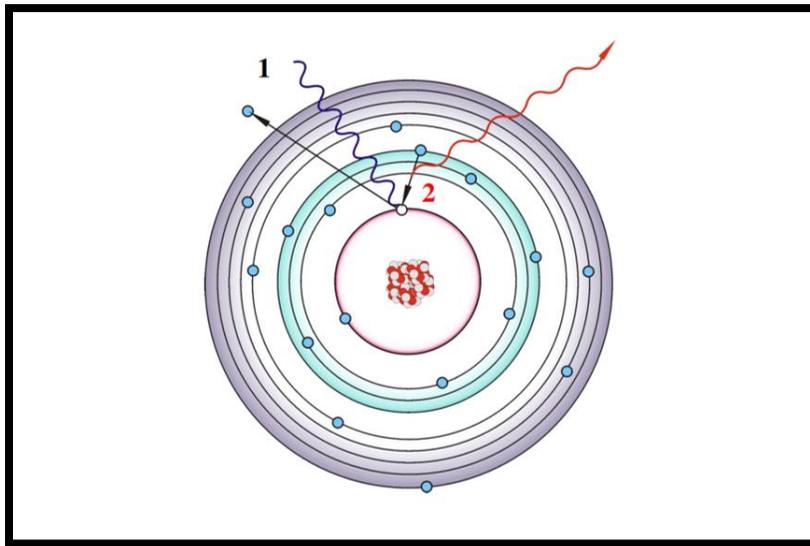


Figura 2. 7. Capas electrónicas de elementos. Fuente: Beuchaine, M. (2012). *Revisión de las aplicaciones de TXRF para el análisis de elementos traza*. Bruker AXS Inc.

En el análisis cualitativo, la energía, y por lo tanto la longitud de onda, de la radiación de fluorescencia de rayos X es característica para los diferentes elementos químicos. En el análisis cualitativo, la intensidad de la radiación de fluorescencia de rayos X es, de primera aproximación, proporcional a la concentración de elementos.

Cada elemento muestra un patrón de línea específico en un espectro, esto en función de los orbitales implicados.

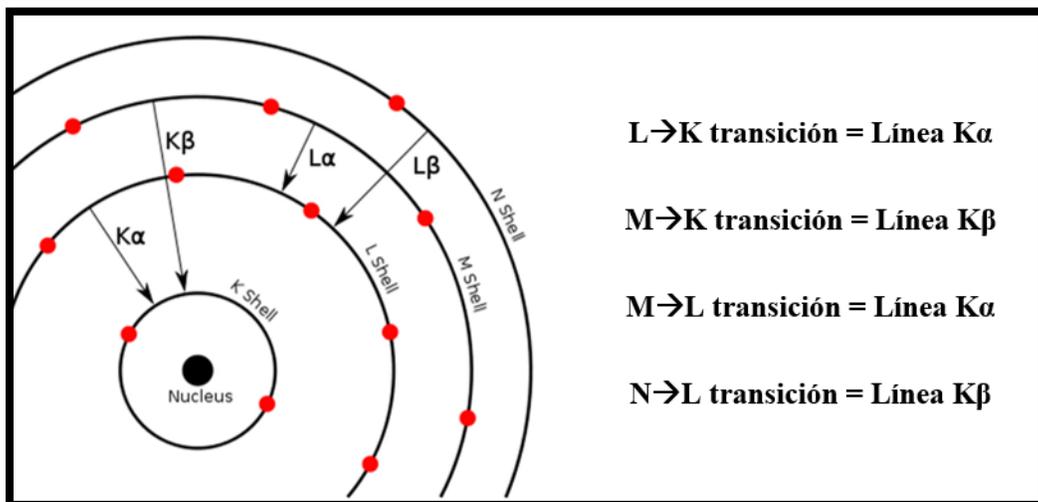


Figura 2. 8. Transiciones electrónicas de los orbitales atómicos. Fuente: Beauchaine, M. (2012). *Revisión de las aplicaciones de TXRF para el análisis de elementos traza*. Bruker AXS Inc.

Según la Agencia Internacional de Energía atómica (2009), la fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF) es una técnica de análisis elemental, de superficie que a menudo se utiliza para el análisis de ultra-trazas de partículas, residuos, y las impurezas en las superficies lisas.

TXRF es esencialmente una técnica de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía dispuesta en una geometría especial. Un haz de rayos incidentes choca contra un portamuestras (cuarzo) plano y pulido en ángulos por debajo del ángulo crítico de reflexión total externo para los rayos X, lo que resulta en el reflejo de la mayor parte de los fotones del haz de excitación a esta superficie.

La muestra, un pequeño residuo depositado en el portamuestras; la cual, se ve como una capa muy delgada bajo un ángulo muy pequeño. Debido a esta configuración, el fondo espectral medido en TXRF es menor que en fluorescencia de rayos X convencional, esta reducción resulta en un aumento de señal a ruido.

La fluorescencia de rayos X por reflexión total se puede clasificar de acuerdo a su ámbito de aplicación:

- a. Análisis químico a granel: las muestras son sometidas a procesos más o menos intensos de tratamiento químico para la suspensión, disolución, la mineralización, preconcentración y separación.
- b. Microanálisis: se analizan pequeñas cantidades de muestra (por lo general unos pocos gramos). En este aspecto TXRF es una herramienta valiosa en la arqueometría y la medicina forense.
- c. Análisis de superficie: la calidad química de las superficies planas está lista para ser analizada por TXRF.

Una de las causas que limitan la relación de señal de ruido en las técnicas de EDXRF basadas en el uso de la excitación directa del tubo de rayos X, es la presencia de una contribución de fondo significativa en los espectros medidos. Este fondo se debe a la dispersión del tubo de frenamiento de rayos X, los fotones de alta energía dispersada no sólo aumentan el fondo en la región de alta energía de los espectros medidos, sino también pueden llevar a cabo múltiples actos de dispersión y aparecen como fondo en la región de baja energía.

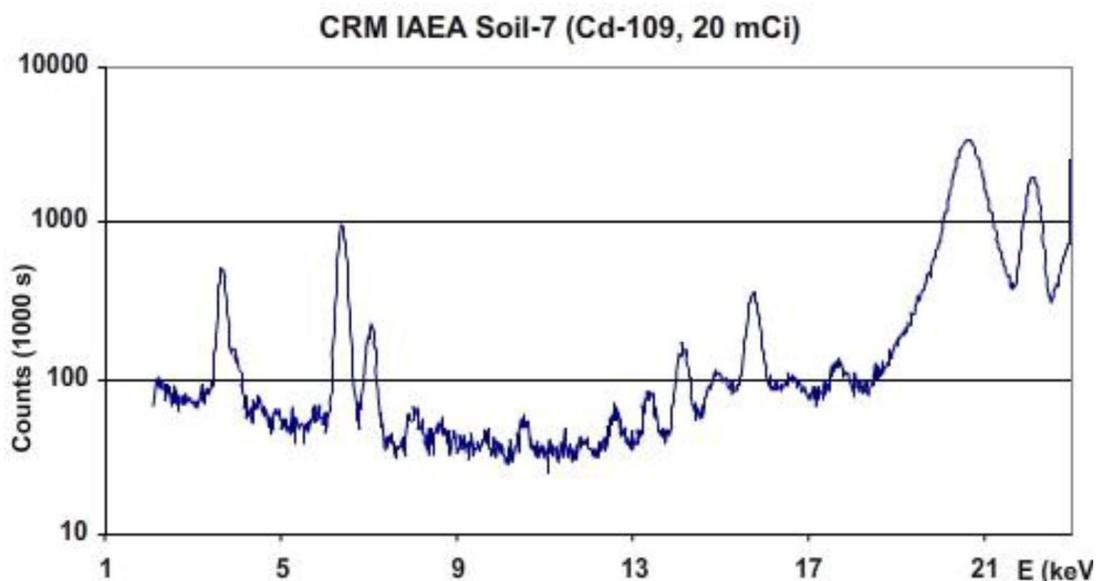


Figura 2. 9. Espectro generado con fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (2009). *Análisis de fluorescencia de rayos-X por reflexión total.*

Los rayos X, al igual que cualquier otra onda electromagnética, siguen una trayectoria en línea recta en cualquier medio homogéneo (transparente), por ejemplo, en el vacío. Sin embargo, si el rayo golpea la superficie límite de un segundo medio, como una superficie de un objeto sólido, se desvía de la dirección original.

La naturaleza de la desviación depende de la energía de los fotones, las propiedades de los medios que forman la interfaz y el ángulo de la viga. Bajo ciertas condiciones, el haz puede incluso dividirse, en parte reflejada de vuelta en el primer medio y parcialmente refractada en el segundo.

Contrariamente al comportamiento de los fotones de luz visible, para los rayos X, cualquier medio es menos denso que el vacío y cualquier sólido es ópticamente menos denso que el aire, esto resulta en un haz refractado desviado hacia la interfaz. Siguiendo esta lógica, la interfaz se comporta como un espejo ideal y refleja completamente el haz incidente de nuevo en el medio de filtración 1, este fenómeno se llama reflexión total.

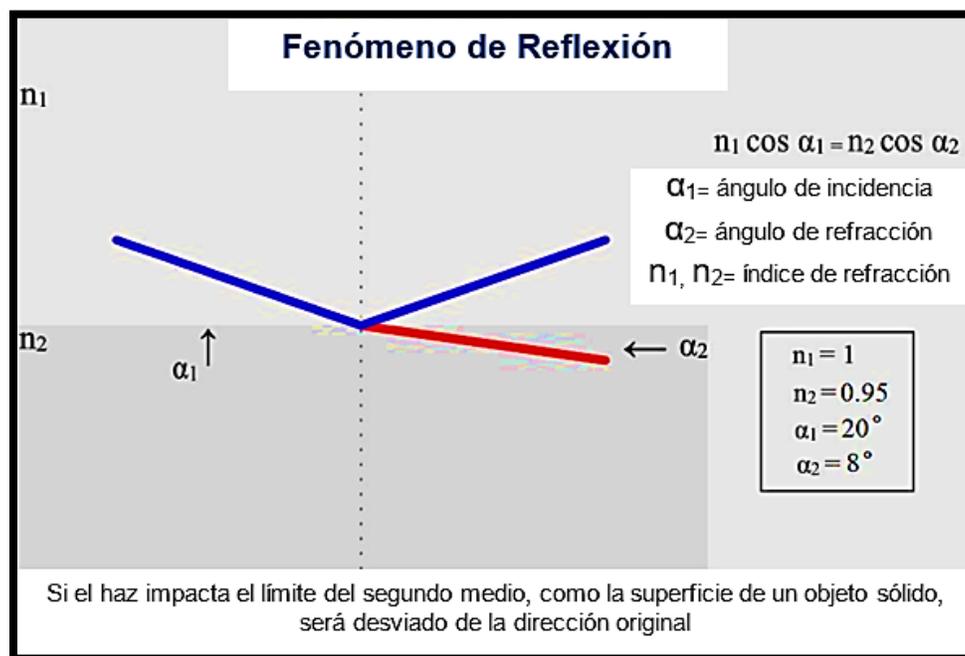


Figura 2. 10. Fenómeno de TRXF. Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (2009). *Análisis de fluorescencia de rayos-X por reflexión total.*

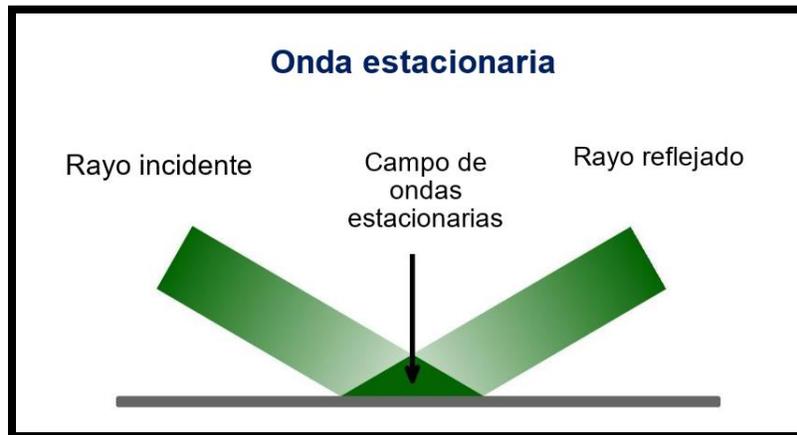


Figura 2. 11. Haz incidente en fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (2009). *Análisis de fluorescencia de rayos-X por reflexión total*.

El ángulo crítico de reflexión total se puede calcular de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\alpha_{crit} \approx \frac{1.65}{E} \sqrt{\frac{Z}{A}} \rho \quad \text{Ec. 2. 1}$$

Donde:

E= energía de los fotones en keV.

Z= numero atómico del reflector.

A= masa atómica en g/mol.

$\rho$  = densidad en g/cm<sup>3</sup>.

Los valores de  $\alpha_{crit}$  establecido es de 0,04° para plexiglás a 35 keV,  $\alpha_{crit}$  es de 0,55 ° para Oro en 8,4 keV (W-L $\alpha$ ) y para cuarzo fundido  $\alpha_{crit}$  es de 0,10° a 17,44 keV (Mo-K $\alpha$ ). De la ecuación anterior dos importantes conclusiones se pueden hacer:

- a. Los fotones de energía dados se reflejan solo por debajo de un determinado ángulo de inclinación llamado ángulo crítico.
- b. Un conjunto reflector en un ángulo particular reflejará sólo ciertos fotones fuera de un haz policromático, es decir, aquellos cuya energía de impacto cumplan la condición de reflexión total.

Hay varios diseños de espectrómetros TXRF, pero para el uso general de laboratorio que normalmente se basan en la utilización de tubos de rayos X, el haz colimado policromático de un tubo de rayos X convencional es desviado por el primer reflector, lo que altera el

espectro primario. Para la mayoría de aplicaciones, un bloque de vidrio de cuarzo pulido plano es suficiente, actuando como un filtro de paso bajo para la eliminación de los altos fotones de energía de la radiación de frenado continuo (corte). Alternativamente, este primer reflector puede ser sustituido por un dispositivo que actúa como monocromador. Se utilizan algunos cristales individuales o dispositivos multicapa estructurados, que actúan como reflectores de Bragg.

Sólo se permite que el haz reflejado en este modificador de espectro, golpee el portamuestras bajo incidencia tangencial, en un ángulo inferior a la reflexión total se asegura la energía de excitación principal. La radiación de rayos X que emerge de la muestra se mide usando un detector en estado sólido de energía dispersiva, por lo general un detector de Silicio (Si). Dado que las secciones transversales de dispersión son mínimas a 90 grados, el detector se monta con su ventana de entrada paralelo al plano de portamuestras, a fin de obtener espectros con el fondo mínimo de dispersión. La distancia a la muestra se reduce a aproximadamente a 1 mm con el fin de asegurar la detección de la radiación de fluorescencia dentro de un ángulo sólido grande. La señal de medición se ordena por amplitud (proporcional a la energía de los rayos X) en un analizador multicanal, lo que lleva a un espectro de energía dispersiva. Las mediciones pueden ser llevadas a cabo en aire ambiente, pero la cámara de muestra más sofisticado se puede diseñar para llevar a cabo mediciones en vacío para reducir la atenuación de la radiación de emisión característica de baja energía en el aire.

## II. Descripción del equipo utilizado.

El equipo utilizado es el de Análisis de TXRF con excitación por tubo de Rayos X. del Centro de Investigación y Aplicaciones Nucleares (CIAN-FIA-UES), el cual cuenta para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF), con un generador de rayos X marca SIEMENS modelo KRISTALOFLEX 760, con un tubo de rayos X, con ánodo de Molibdeno. Los espectros son adquiridos en el sistema de espectrometría de rayos X, constituido por un detector de Silicio activado con Litio, con ventana de Berilio y su electrónica asociada; y almacenados en una PC mediante el software Aptec.

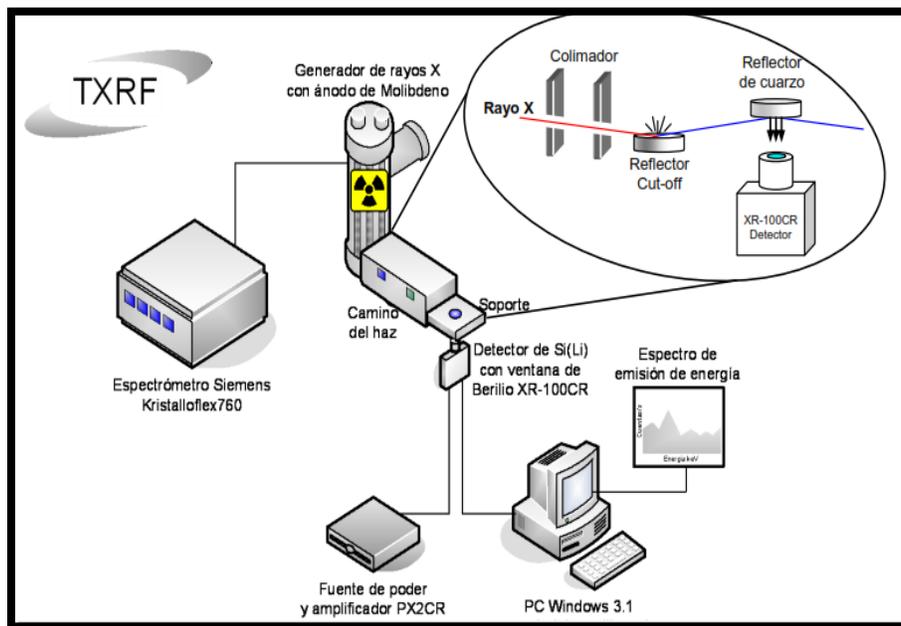


Figura 2. 12. Esquema del sistema de TXRF con excitación por tubo de rayos X del CIAN. Fuente: Cuadra Zelaya, C. D. y Romero García, D. A. (2006). *Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el Lago Suchitlan*. Universidad de El Salvador, San Salvador.

### III. Nivel de detección e interpretación de resultados.

TXRF es un método bastante versátil y rentable para análisis multi-elemental, esta tiene las siguientes fortalezas:

- a. Se puede utilizar como herramienta de análisis de micro-analítico, tales especímenes como pequeños granos depositados en el soporte de muestras.
- b. Se ha aplicado eficazmente para el análisis de elementos traza en varios campos de investigación.
- c. Debido a la mejora en la relación señal/ruido, los límites de detección instrumentales son típicamente en el intervalo de pg o ng/mL.
- d. Como la muestra constituye una capa muy delgada, la cuantificación es menos propenso a la influencia de la matriz (sin necesidad de corrección de la atenuación o mejora de los efectos).

## 2.8. ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO

### I. Fundamento teórico.

La espectroscopia de absorción atómica es una de las técnicas más empleada para la determinación de metales en una amplia variedad de matrices. Su popularidad se debe a su especificidad, sensibilidad y facilidad de operación.

Según información de la FAO (Razmilic, 2015), el átomo consiste de un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos, la configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como “estado fundamental”.

Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía, éste experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia.

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado excitado ( $E_1$ ) y el estado fundamental ( $E_0$ ) como se encuentra descrito en la ecuación de Planck:

$$E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{Ec. 2. 2}$$

Donde:

$h$ = constante de Planck.

$\nu$ = frecuencia.

$c$ = velocidad de la luz.

$\lambda$  = longitud de onda.

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados ( $E_1, E_2, E_3, \dots$ ) y de cada uno de ellos emitir una radiación ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ ) característica, obteniéndose así un espectro atómico, caracterizado por presentar un gran número de líneas discretas. En absorción

atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado, esto se conoce como longitud de onda de resonancia.

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. En absorción atómica interesa medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental. Estos absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su concentración atómica.

Como la trayectoria de la radiación permanece constante y el coeficiente de absorción es característico para cada elemento, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes.

Según Litter, Armienta, y Farías (2009), la espectroscopia de absorción atómica involucra fundamentalmente dos procesos: la atomización de la muestra y la absorción de radiación proveniente de una fuente por los átomos libres. El tratamiento de la muestra hasta la atomización consta de las siguientes etapas:

- a. Secado: la muestra inyectada (2-20  $\mu\text{L}$ ) en el horno de grafito es sometida a una temperatura algo inferior al punto de ebullición del solvente (80-180  $^{\circ}\text{C}$ ). Aquí se evaporan el solvente y los componentes volátiles de la matriz.
- b. Calcinación o incineración: en esta etapa, la temperatura es elevada para eliminar la materia orgánica (350-1300  $^{\circ}\text{C}$ ).
- c. Atomización: en esta etapa, el horno es calentado rápidamente, de manera que el analito pasa al estado atómico (1800-2800  $^{\circ}\text{C}$ ).

Usualmente se agrega una cuarta etapa para limpieza del horno, de 3000  $^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, cuanto mejor sea la separación de elementos contaminantes del analito antes de la atomización, la determinación estará más libre de interferencias.

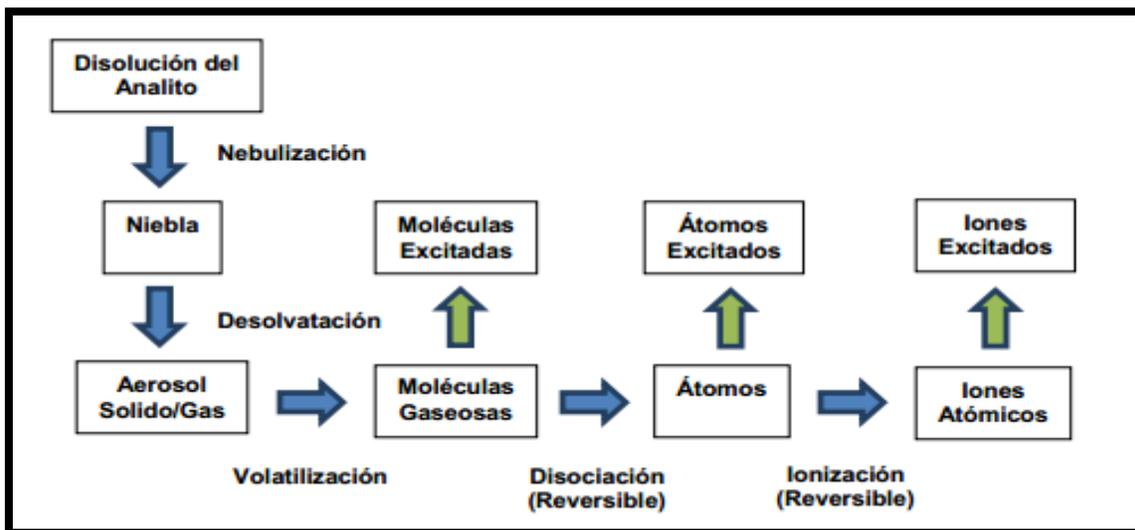


Figura 2. 13. Procesos que se llevan a cabo en la atomización de la muestra. Fuente: Araujo Chévez, C. I. (2010). *Cuantificación de Plomo, Mercurio y Níquel en agua de consumo humano de cinco comunidades de El Salvador por espectrofotometría de absorción atómica*. Universidad de El Salvador, San Salvador.

En la Figura 2.14 se observan los componentes básicos de un equipo de absorción atómica.

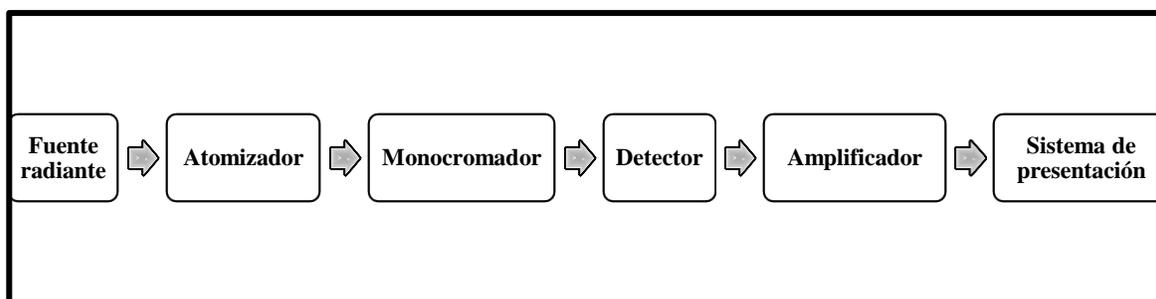


Figura 2. 14. Esquema del sistema de absorción atómica. Fuente: Razmilic, B. (2015). *Control de calidad de insumos y dietas acuícolas*.

La fuente radiante más común para las mediciones de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco, que consiste en un cilindro relleno con un gas inerte dentro del cual se encuentra un cátodo (construido del metal a analizar) y un ánodo. Al aplicar un cierto potencial a través de los electrodos esta fuente emite el espectro atómico del metal del cual está construido el cátodo.

En la Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA) se utilizan atomizadores con y sin llama para producir átomos libres del metal en el haz de la radiación. El atomizador con llama está

compuesto de un nebulizador y un quemador. La solución de la muestra es convertida primero a un fino aerosol, y luego llevada a la llama que entrega la energía suficiente para evaporar el solvente y descomponer los compuestos químicos resultantes en átomos libres en su estado fundamental.

Las mezclas de gases más usados para producir la llama adecuada son: aire/propano, aire/acetileno y óxido nitroso/acetileno. Generalmente, la elección dependerá de la temperatura requerida para la disociación de los compuestos y de las características químicas del elemento a determinar.

En los atomizadores sin llama-atomización electrotérmica con horno de grafito, el vapor atómico se genera en un tubo de grafito calentado eléctricamente, en cuyo interior se ubica la muestra. Estos atomizadores presentan diversas ventajas, como una alta eficiencia en generar vapor atómico, permite el empleo de pequeños volúmenes de muestra y análisis directo de muestras sólidas.

Los espectrofotómetros de absorción atómica poseen generalmente monocromadores de red con montaje de Littrow o de Czerny-Turner. Estos monocromadores permiten aislar una línea de resonancia del espectro emitido por la lámpara de cátodo hueco.

Como detector, se emplea un fotomultiplicador que produce una corriente eléctrica, la cual es proporcional a la intensidad de la línea aislada por el monocromador. Un amplificador selectivo amplifica la señal pasando luego a un dispositivo de lectura que puede ser un voltímetro digital o un registrador u otros.

En espectroscopia de absorción atómica la concentración de un elemento en una muestra se determina por comparación de la absorbancia de la solución muestra con la absorbancia de soluciones estándar de concentración conocida. Si cualquier constituyente de la muestra altera uno o más pasos en el proceso de formación de átomos en su estado fundamental en la llama, llevará a un error en la medición de la concentración. Las interferencias que se pueden producir en espectroscopia de absorción atómica se clasifican en: físicas químicas, de ionización y espectrales.

Cuando la absorbancia de soluciones estándar de concentración conocida del elemento a determinar se grafica vs. la concentración, se obtiene una curva de calibración. La curva así obtenida es generalmente lineal a bajas concentraciones y la concentración de la muestra puede ser determinada por interpolación de su absorbancia en la curva de calibración.

Para emplear este método de análisis cuantitativo las composiciones de las soluciones estándar deben ser preparadas lo más semejante posible a la composición de la solución-muestra para compensar o eliminar interferencias.

Especialmente útil resulta el empleo del método de adición estándar, el cual permite trabajar en presencia de una interferencia sin eliminarla y obtener una determinación con buena exactitud del elemento en la solución-muestra. Interferencias físicas y algunas interferencias químicas pueden ser compensadas empleando este método que consiste en la adición de cantidades diferentes de una solución estándar del elemento a determinar a varias porciones iguales de la solución-muestra. De esta forma, la interferencia afectará por igual a todas las soluciones. Si existe interferencia, se observará que la pendiente de la adición estándar es menor que la de la curva de calibración.

## II. Descripción del equipo utilizado.

El espectrómetro de absorción atómica con que cuenta el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares es de marca Thermo Scientific, modelo iCE 3500 (véase Figura 2.15). Este equipo posee un horno de grafito que ofrece un rendimiento excepcional, flexibilidad y funcionalidad; este sistema de horno es de última generación, con la capacidad de generar un espectro de alta resolución; por tanto, es muy útil en análisis que requieren límites de detección ultrasensibles y alta capacidad de rendimiento de procesamiento; en la Tabla 2.15 se observan las especificaciones del espectrofotómetro de absorción atómica utilizado en el Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN).

Tabla 2. 15. Especificaciones del espectrómetro de absorción atómica del CIAN.

<b>Correcciones de fondo</b>	Línea cuádruple garantizada de deuterio o sistemas de CA Zeeman.	<b>Lámpara de carrusel</b>	Lámpara-codificado, auto-alineación.
<b>Opción de horno atomizador</b>	GFS35 or GFS35 (Z) combined module.	<b>Monocromador</b>	Tipo Eschelle.
<b>Llama del atomizador</b>	Sistema universal (50mm utiliza con aletas hornilla de Titanio).	<b>Ópticos</b>	Doble haz.
<b>Sistema de visión del horno</b>	Como estándar.	<b>PC Software</b>	Se incluye como estándar.
<b>El manejo de gases</b>	Control binario automatizado.	<b>Fotomultiplicador</b>	Amplia gama (180nm te 900nm).

Fuente: Thermo Fisher Scientific (2016). *Espectrofotómetro de Absorción Atómica iCE™ 3000*.

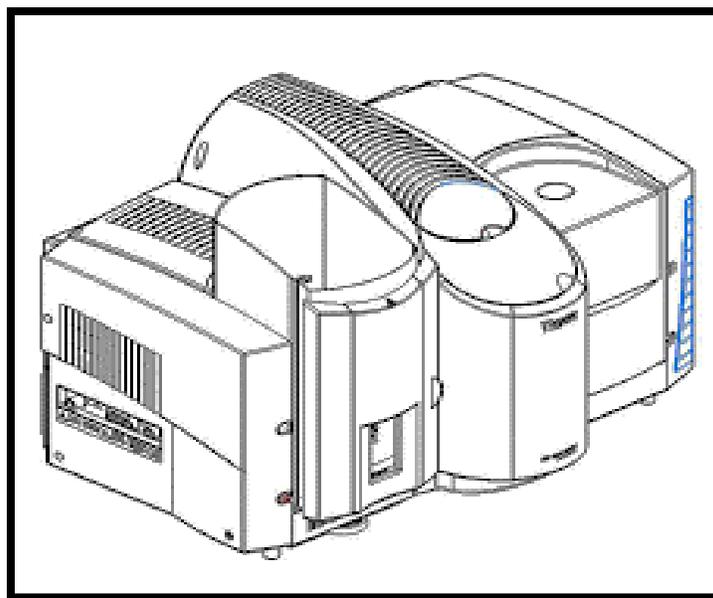


Figura 2. 15. Equipo de espectroscopia de absorción atómica por horno de grafito. Fuente: Thermo Fisher Scientific (2016). *Espectrofotómetro de Absorción Atómica iCE™ 3000*.

### III. Nivel de detección e interpretación de resultados.

La EAA constituye una de las técnicas más empleadas para la determinación de más de 60 elementos, principalmente en el rango de  $\mu\text{g/ml}$  y  $\text{ng/ml}$  en una gran variedad de muestras. Entre algunas de sus múltiples aplicaciones se tiene el análisis de aguas, muestras geológicas, muestras orgánicas, metales y aleaciones, petróleo y sus subproductos; y de amplia gama de muestras de industrias químicas y farmacéuticas.

**CAPÍTULO 3:  
METODOLOGÍA DE  
INVESTIGACIÓN.**

### **3.1. VISITAS EXPLORATORIAS A LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RELLENO SANITARIO**

Se realizaron dos visitas exploratorias en la que se identificaron los posibles puntos de muestreo y se elaboró lo que fue el inventario de puntos de muestreo de las diferentes matrices de estudio, agua superficial, agua subterránea, sedimento de río, suelo y biomasa.

#### **3.1.1. VISITA EXPLORATORIA I**

La primera visita exploratoria consistió en la identificación de puntos de muestreo de las matrices de sedimento, agua superficial y subterránea.

Para las matrices de agua superficial, específicamente del río Pululuya se realizó un recorrido, en el que se identificaron aguas arriba, aguas al medio y aguas abajo. Se tomaron las coordenadas de cada punto, en los cuales se recolectaron posteriormente muestras de agua y sedimento.

Además, se identificaron los pozos de la zona y se tomaron las coordenadas, detallando en la hoja de ubicación de puntos, los datos necesarios para la selección de pozos a muestrear. Este recorrido no se completó, por lo cual se tomaron únicamente los datos de siete pozos.

#### **3.1.2. VISITA EXPLORATORIA II**

Se completó el recorrido para puntos de muestreo de pozos, en el cual, se siguió la misma metodología de toma de datos que la visita anterior, en esta ocasión se levantaron 10 puntos más. Se realizó el recorrido a la zona delimitada de 1500 metros, en la parte más baja sobre el nivel del mar (Lado Este), se identificaron las zonas de cultivos presentes y se guardaron sus coordenadas en el GPS, Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System). Además, se recopilaron los datos necesarios para realizar el método de ponderación, que se detalla en la sección 3.3.

Para cada zona de cultivo, se tomó su respectiva coordenada de matriz de suelo. Además, durante el recorrido se identificó dos quebradas cercanas al relleno sanitario que fueron de

interés, por lo que se registró su ubicación y también se incluyeron en el levantamiento de inventario de matrices de suelo.

### 3.2. INVENTARIO DE PUNTOS DE MUESTREO PARA MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, SEDIMENTO, SUELO Y BIOMASA

En esta sección se presenta la recopilación de los datos más importantes obtenidos durante las visitas exploratorias a la zona de influencia a 1500 m alrededor del relleno sanitario de la región Metropolitana de Sonsonate.

#### 3.2.1. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE AGUA SUPERFICIAL

Se definieron cuatro puntos de muestreo para río, con las cuales teniendo las coordenadas del relleno sanitario se calculó la distancia de cada punto al mismo, esto se detalla en la Tabla 3.1. El código de identificación fue el siguiente:

- RPAS: Siglas de, río Pululuya agua superficial.
- 01-04: Corresponde al orden de toma de punto.

Tabla 3. 1. Identificación del inventario de puntos para la matriz de agua superficial, río Pululuya.

Nombre del Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas forma cónica conformal de Lambert*		Distancia al Relleno Sanitario(m)
			Xlamb	Ylamb	
<b>RPAS01</b>	13°34.614' N	89°39.707' W	427535.48	273000.62	990.42
<b>RPAS02</b>	13°34.559' N	89°39.696' W	428378.97	272965.65	949.73
<b>RPAS03</b>	13°34.255' N	89°40.218' W	428398.49	272864.15	170.53
<b>RPAS04</b>	13°33.864' N	89°40.245' W	427455.40	272306.32	817.22

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

El punto RPAS01 correspondió al río San Lucas, el cual se une con el río Pululuya en el punto RPAS02, tomado como aguas arriba. El punto RPAS03 correspondió a aguas al medio y el punto RPAS04, aguas abajo.

### 3.2.2. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE SEDIMENTO

En base a los puntos definidos para la matriz de agua superficial se estableció cuatro puntos de muestreo para la matriz de sedimento. El código de identificación fue el siguiente:

- RPSE: Siglas de, río Pululuya Sedimento
- 01-04: Corresponde al orden de toma de punto.

Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Identificación del inventario de puntos para la matriz de sedimento del río Pululuya.

Nombre del Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas forma cónica conformal de Lambert*		Distancia al Relleno Sanitario(m)
			Ylamb	Xlamb	
RPSE01	13°34.614' N	89°39.707' W	427535.48	273000.62	990.42
RPSE02	13°34.559' N	89°39.696' W	428378.97	272965.65	949.73
RPSE03	13°34.255' N	89°40.218' W	428398.49	272864.15	170.53
RPSE04	13°33.864' N	89°40.245' W	427535.48	273000.62	817.22

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

Donde el punto RPSE01 correspondió al río San Lucas el cual se une con el río Pululuya en el punto RPSE02, tomado como aguas arriba. El punto RPSE03 correspondió a aguas al medio y el punto RPSE04, aguas abajo.

### 3.2.3. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se obtuvo un total de 17 puntos posibles de muestreo de pozos, en la zona de estudio. Para los cuales se presenta una recopilación de datos en la Tabla 3.3. Conociendo las coordenadas del relleno sanitario de Sonsonate y las coordenadas de cada punto, se calcularon las respectivas distancias. El código de identificación fue el siguiente:

- POZO: Identificación de la matriz de agua de pozo.
- 01-17: Corresponde al orden de toma de punto.

Tabla 3. 3. Inventario de puntos para la matriz de agua subterránea.

Punto	Coordenadas Geográficas		Distancia (m)	Coordenadas forma cónica conformal de Lambert*		Uso del Agua	Cantidad de Personas
				Xlamb	Ylamb		
<b>POZO01</b>	13°34.668' N	89°39.723' W	1031.85	273065.89	428349.89	Doméstico	5
<b>POZO02</b>	13°34.696' N	89°39.474' W	1432.82	273117.43	428800.07	Consumo	más de 20
<b>POZO03</b>	13°34.525' N	89°40.054' W	457.66	272802.63	427751.46	Sin uso	0
<b>POZO04</b>	13°34.466' N	89°40.046' W	362.24	272694.02	427765.93	Doméstico/ Regadío	1
<b>POZO05</b>	13°34.264' N	89°40.253' W	227.38	272322.15	427391.68	Doméstico	3
<b>POZO06</b>	13°33.876' N	89°40.249' W	797.7	271607.86	427398.92	Sin uso	0
<b>POZO07</b>	13°34.003' N	89°40.420' W	752.55	271841.66	427089.76	Doméstico	más de 20
<b>POZO08</b>	13°34.628' N	89°39.690' W	1031.17	272992.25	428409.55	Doméstico	3
<b>POZO09</b>	13°34.811' N	89°39.821' W	1123.35	273329.14	428172.71	Consumo/ Doméstico	5
<b>POZO10</b>	13°34.257' N	89°40.241' W	209.27	272309.26	427413.38	Consumo/ Doméstico	5
<b>POZO11</b>	13°34.242' N	89°40.241' W	219.21	272281.64	427413.38	Doméstico	5
<b>POZO12</b>	13°34.257' N	89°40.148' W	68.5	427581.52	272309.26	Regadío	No Aplica
<b>POZO13</b>	13°34.201' N	89°39.977' W	333.75	427890.68	272206.17	Consumo/ Doméstico/Regadío	5
<b>POZO14</b>	13°34.177' N	89°40.007' W	314.81	427836.44	272161.98	Regadío	No Aplica
<b>POZO15</b>	13°34.136' N	89°40.003' W	374.72	427843.67	272086.50	Consumo	más de 20
<b>POZO16</b>	13°33.830' N	89°40.508' W	1100.11	426930.66	271523.18	Consumo	más de 20
<b>POZO17</b>	13°33.862' N	89°40.188' W	800.72	427509.20	271582.09	Consumo de Animales	25 animales

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.2.4. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE BIOMASA**

Se obtuvo un total de nueve zonas de cultivos, para las cuales se presenta en la Tabla 3.4 los datos más importantes recolectados. La distancia al relleno sanitario, fue calculada de la misma forma que la distancia para las matrices anteriores. El código de identificación fue el siguiente:

- CULT: Abreviación de la palabra cultivo.
- 01-09: Corresponde al orden de toma de punto.

### **3.2.5. INVENTARIO DE PUNTOS PARA LA MATRÍZ DE SUELO**

Se levantó un total de nueve zonas de muestreo para suelo, correspondientes a cada zona de cultivo, además se tomaron dos puntos que no corresponden a cultivos pero que fueron de interés para la investigación, ya que se ubicaron en quebradas cercanas al relleno sanitario. Los datos obtenidos para estos puntos se presentan en la Tabla 3.5. La distancia al relleno sanitario, fue calculada de la misma forma que la distancia para las matrices anteriores.

## **3.3. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO PARA LAS DIFERENTES MATRICES**

El método de ponderación se utilizó para la elección de los puntos de muestreo para agua subterránea y biomasa. Este método se realizó debido a que se debía contemplar la importancia que cada posible muestra representa para la investigación.

Se diseñaron los cuadros de ponderación según criterio del grupo de investigación, basados en los objetivos que persigue el trabajo.

Tabla 3. 4. Coordenadas del inventario de puntos para la matriz de biomasa.

Nombre del punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert*		Tipo de cultivo	Distancia al relleno (m)	Tipo de regadío	Muestra disponible (cultivo presente)	Extensión de cultivos
			Ylamb	Xlamb					
<b>CULT01</b>	13°34.533' N	89°39.575' W	272817.36	428617.47	Maiz y maicillo	1126.741	Río/ lluvia	No disponible/ totalmento seco	1 manzana y media
<b>CULT02</b>	13°34.578' N	89°39.670' W	272900.20	428445.71	Maiz	1009.184	Río/ lluvia	Disponible	½ manzana
<b>CULT03</b>	13°34.775' N	89°39.820' W	273262.87	428174.52	Caña	1067.745	Río/ pozo	Disponible en etapa de crecimiento medio	10 manzanas
<b>CULT04</b>	13°34.205' N	89°40.170' W	272213.53	427541.74	Ejote, yuca, frijoles, papaya, mango, platano, caña	173.057	Río	Disponibles/ caña disponible en etapa de crecimiento avanzado	3 manzanas
<b>CULT05</b>	13°34.177' N	89°40.007' W	272161.98	427836.44	Caña	314.813	Pozo	Disponible/ en etapa de crecimiento avanzada	12 manzanas
<b>CULT06</b>	13°33.878' N	89°40.477' W	271611.54	426986.71	Caña y cocos	994.989	Pozo	Caña en etapa de crecimeinto inicial/ coco disponible	10 manzanas de caña
<b>CULT07</b>	13°34.466' N	89°40.046' W	272694.02	427765.93	Caña	362.243	Pozo	Disponible en etapa de crecimiento inicial	30 manzanas
<b>CULT08</b>	13°33.876' N	89°40.249' W	271607.86	427398.92	Coco, mango, marañon	797.698	Pozo	Disponible	4 manzanas aproximadamente
<b>CULT09</b>	13°34.264' N	89°40.253' W	272322.15	427391.68	Ayote	227.376	Río	Diposnible	3 metros cuadrados

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 5. Coordenadas del inventario de puntos para la matriz de suelo.

Nombre del punto	Coordenadas		Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert*		Distancia al relleno sanitario (m)	Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert*	Extensión del terreno
			Xlamb	Ylamb			
<b>SUEL01</b>	13°34.533' N	89°39.575' W	427819.26	272111.71	1126.74	Cultivo	1.5 manzanas
<b>SUEL02</b>	13°34.578' N	89°39.670' W	427797.68	272135.66	1009.18	Cultivo	0.5 manzanas
<b>SUEL03</b>	13°34.775' N	89°39.820' W	427663.81	272021.76	1067.74	Cultivo	10 manzanas
<b>SUEL04</b>	13°34.497' N	89°40.105' W	427710.37	272536.05	385.22	Quebrada	No disponible
<b>SUEL05</b>	13°34.475' N	89°40.123' W	427943.74	272784.31	341.45	Quebrada	No disponible
<b>SUEL06</b>	13°34.205' N	89°40.170' W	427825.22	272312.59	173.06	Cultivo	3 manzanas
<b>SUEL07</b>	13°34.177' N	89°40.007' W	427566.97	271561.04	314.81	Cultivo	12 manzanas
<b>SUEL08</b>	13°33.878' N	89°40.477' W	427392.30	272304.61	994.99	Cultivo	10 manzanas
<b>SUEL09</b>	13°34.466' N	89°40.046' W	427508.28	272523.67	362.24	Cultivo	30 manzanas
<b>SUEL10</b>	13°33.876' N	89°40.249' W	427352.45	272256.82	797.70	Cultivo	No disponible
<b>SUEL11</b>	13°34.264' N	89°40.253' W	427391.6	272322.158	227.375	Cultivo	3 metros cuadrados

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA MATRÍZ DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se realizó el método de ponderación para los 17 puntos de agua subterránea obtenidos en las visitas exploratorias I y II, utilizando los criterios mostrados en la Tabla 3.6, y se obtuvo como resultado el cuadro de ponderación presentado en la Tabla 3.7.

Tabla 3. 6. Escalas de puntuación para método ponderado en muestreo de agua subterráneas.

<b>Criterio</b>	<b>Escala de puntuación</b>
<b>Cercanía al relleno sanitario.</b>	0 a 250 m: 10 251 a 500 m: 8 501 a 700 m: 6 701 a 1000 m: 4 1001 a 1500 m: 2
<b>Uso del Agua.</b>	Para consumo humano: 10 Para regadío de cultivos: 8 Uso diario doméstico: 6 Consumo de animales: 4 Pozo sin uso: 0
<b>Cantidad de personas que utilizan el pozo.</b>	8 o más: 10 De 5 a 7: 8 De 2 a 4: 6 1: 4 No es utilizado: 0

Fuente: Elaboración propia.

Los pozos que tienen diversos usos, se tomó como valor de puntuación el máximo. Se colocó N/A (no aplica) a aquellos pozos que no contemplaron ninguno de los parámetros del cuadro de ponderación establecido. Los pozos que aparecen detallados en color amarillo, fueron los seleccionados, debido a que obtuvieron las mayores puntuaciones y cumplieron además con el fin del estudio: ser de consumo, regadío de cultivos o uso doméstico, para los cuales se consideró el efecto directo que pueden tener sobre los seres humanos (véase Tabla 3.7).

Además, estos puntos se encontraban distribuidas aguas arriba, aguas abajo y aguas al medio, con respecto al relleno sanitario.

Tabla 3. 7. Ponderación y selección para matriz de agua subterránea.

PUNTO	DISTANCIA AL RELLENO SANITARIO (40%)			USO DE AGUA (30%)			CANTIDAD DE PERSONAS QUE UTILIZAN EL POZO (30%)			PUNTUACIÓN GLOBAL
	Distancia (m)	Puntuación	Total	Uso	Puntuación	Total	Cantidad de Personas	Puntuación	Total	
<b>POZO10</b>	209.27	10	4	Consumo/ Doméstico	10	3	5	8	2.4	9.4
<b>POZO15</b>	374.72	8	3.2	Consumo	10	3	más de 20	10	3	9.2
<b>POZO13</b>	333.75	8	3.2	Consumo/ Doméstico/ Regadío	10	3	5	8	2.4	8.6
<b>POZO11</b>	219.21	10	4	Doméstico	6	1.8	5	8	2.4	8.2
<b>POZO05</b>	227.38	10	4	Doméstico	6	1.8	3	6	1.8	7.6
<b>POZO02</b>	1432.82	2	0.8	Consumo	10	3	más de 20	10	3	6.8
<b>POZO04</b>	362.24	8	3.2	Doméstico/ Regadío	8	2.4	1	4	1.2	6.8
<b>POZO16</b>	1100.11	2	0.80	Consumo	10	3	más de 20	10	3	6.8
<b>POZO07</b>	752.55	4	1.6	Doméstico	6	1.8	más de 20	10	3	6.4
<b>POZO12</b>	68.5	10	4	Regadío	8	2.4	N/A	0	0	6.4
<b>POZO09</b>	1123.35	2	0.8	Consumo/ Doméstico	10	3	5	8	2.4	6.2
<b>POZO17</b>	800.72	4	1.6	Consumo de Animales	4	1.2	25 animales	10	3	5.8
<b>POZO14</b>	314.81	8	3.2	Regadío	8	2.4	N/A	0	0	5.6
<b>POZO01</b>	1031.85	2	0.8	Doméstico	6	1.8	5	8	2.4	5
<b>POZO08</b>	1031.17	2	0.8	Doméstico	6	1.8	3	6	1.8	4.4
<b>POZO03</b>	457.66	8	3.2	Sin uso	0	0	0	0	0	3.2
<b>POZO06</b>	797.7	4	1.6	Sin uso	0	0	0	0	0	1.6

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2. MÉTODO DE PONDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS EN LA MATRÍZ DE BIOMASA

Se registraron nueve puntos de biomasa, se utilizaron los criterios de puntuación presentados en la Tabla 3.8, sin embargo, el método de ponderación de la Tabla 3.9 se realizó únicamente para las muestras que se encontraban disponibles, en diferentes etapas de crecimiento.

Tabla 3. 8. Escalas de puntuación para método ponderado en muestreo de cultivos.

<b>Criterio</b>	<b>Escala de puntuación</b>
<b>Cercanía al relleno sanitario (50%)</b>	0 a 250 m: 10 251 a 500 m: 8 501 a 700 m: 6 701 a 1000 m:4 1001 a 1500 m: 2
<b>Tipo de Regadío (30%)</b>	Pozo: 10 Río: 10 Lluvia: 5 Otros: 2
<b>Etapas de Crecimiento de Cultivo (20%)</b>	Crecimiento inicial: 6 Crecimiento medio: 8 Crecimiento avanzado: 10

Fuente: Elaboración propia.

Las etapas de crecimiento fueron tomadas según lo observado en la visita exploratoria II, tomando como crecimiento avanzado, los cultivos con mayor crecimiento encontrados y los de menor tamaño como crecimiento inicial. Para las zonas de cultivos que utilizaban dos formas de riego, se colocó la puntuación más alta correspondiente a uno de los tipos de riego.

El punto CULT01 no se ponderó debido a que la zona se hallaba totalmente seca, por lo cual, no se encontró muestra disponible. Las zonas seleccionadas por el método de ponderación correspondieron a CULT09, CULT04 y CULT07. Con el fin de delimitar las matrices y cumplir con los objetivos del trabajo se eligieron los dos cultivos representativos para la investigación; es decir, caña y ayote. Caña por ser el cultivo con mayor presencia en

la zona y ayote por estar en la zona mejor ponderada.

Tabla 3. 9. Ponderación y selección de puntos para la matriz de biomasa.

PUNTO	TIPO DE CULTIVO	DISTANCIA AL RELLENO SANITARIO (50%)			TIPO DE REGADIO (30%)			DISPONIBILIDAD DE MUESTRA POR ETAPA DE CRECIMIENTO (20%)			PUNTUACIÓN GLOBAL
		Distancia (m)	Puntos	Total	Tipo de Regadío	Puntos	Total	Etapa de Crecimiento	Puntos	Total	
CULT09	AYOTE	227.375	10	5	RÍO	10	3	AVANZADO	10	2	10
CULT04	EJOTE, YUCA, FRIJOLES, PAPAYA, MANGO, PLATANO, Y CAÑA	173.056	10	5	RÍO	10	3	AVANZADO	10	2	10
CULT07	CAÑA	362.243	8	4	POZO	10	3	INICIAL	6	1.2	8.2
CULT08	COCO, MANGO, MARAÑÓN	797.698	4	2	POZO	10	3	AVANZADO	10	2	7
CULT06	CAÑA/ COCOS	994.988	4	2	POZO	10	3	INICIAL/ AVANZADO	6	1.2	6.2
CULT02	MAIZ	1009.18	2	1	RÍO/ LLUVIA	10	3	AVANZADO	10	2	6
CULT03	CAÑA	1067.74	2	1	RÍO/POZO	10	3	MEDIO	8	1.6	5.6

Fuente: Elaboración propia.

Luego de la elección, se realizó una visita, en la cual se recorrieron las zonas seleccionadas observando las características que estas poseían para la selección de puntos de muestreo.

Durante el recorrido además se localizaron dos zonas más donde existían cultivos de ayote, correspondientes a los puntos CULT10 (SUEL11) y CULT11 (SUEL13).

En principio para la delimitación de las zonas de muestreo de suelo y cultivo se tomaron en cuenta datos de pH, etapas de crecimiento de cultivos, tipo de suelo, distribución y extensión de la plantación. Con estas características se determinó, cuantas muestras corresponderían a cada zona. Las zonas con mayor extensión de cultivos fueron seccionadas para la toma de muestras compuestas, clasificadas por etapas de crecimiento de cultivos.

### **3.4. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS**

Para el muestreo de agua superficial, se realizó una adaptación de Manual de Protocolos Armonizados y Evaluados para la toma de muestra y el Análisis de Aguas y Sedimentos para la Región de América Latina y El Caribe, método Pt-Mu-02 y método Pt-Mu-03. Este procedimiento es detallado en el Anexo 1. Para las muestras de agua superficial no fue necesario filtración en el sitio de muestreo por tratarse de análisis de metales pesados totales.

En el muestreo de sedimentos, se realizó la adaptación del Manual de Protocolos Armonizados y Evaluados para la toma de muestra y el Análisis de Aguas y Sedimentos para la Región de América Latina y El Caribe, método Pt-Mu-02 y método Pt-Mu-03. Ver procedimiento detallado en Anexo 2.

Para el muestreo de pozos, se realizó una adaptación de la Guía Operativa para la Recogida, Almacenamiento y Transporte de Muestras de Aguas Subterráneas Destinadas al Análisis Químico. Dicho procedimiento es detallado en el Anexo 3. Para las muestras de agua subterránea no fue necesario filtración en el sitio de muestreo ya que la metodología no lo establece, por tratarse de análisis de metales pesados totales.

Para el muestreo de suelo, se realizaron dos metodologías diferentes, una para suelo de cultivo y otra para suelo de quebradas; las dos metodologías están basadas en la GUÍA PARA MUESTREO DE SUELOS en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, Perú. Las metodologías son presentadas en Anexo 4 y Anexo 5 respectivamente.

Para el muestreo de biomasa se tomaron diferentes tipos de cultivos (caña de azúcar y pipián), el procedimiento se basó en una adaptación de la Metodología EPA SOP N° ISSI-VB170-06 Muestreo de vegetales en jardín en residencias para determinación del riesgo basada en la exposición a metales. Ver procedimiento detallado en Anexo 6.

#### **3.4.1. PRESERVACIÓN Y ENVASADO**

En el Anexo 7 se presentan las condiciones adecuadas para la preservación y envasado para las diferentes matrices, según las referencias indicadas.

#### **3.4.2. ETIQUETADO**

El etiquetado correcto durante el muestreo fue sumamente importante, ya que permitió la correcta identificación de cada muestra. La etiqueta incluyó: código, fecha, hora, ubicación, tipo de matriz, cantidad de muestra recolectada, pH inicial, volumen de ácido agregado y pH final; estos últimos tres únicamente a las muestras que lo requirieron. Ver diseño detallado en Anexo 8.

#### **3.4.3. HOJA DE MUESTREO**

Se llenó una hoja de muestreo para cada matriz recolectada, la cual permitió un mejor control de las mismas, con los datos de relevancia para el estudio, se presentan las hojas de muestreo utilizadas en Anexo 9.

### 3.5. MAPAS DE UBICACIÓN DE PUNTOS SELECCIONADOS PARA MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, SEDIMIENTO, SUELO Y BIOMASA

Las muestras de sedimento de río se recolectaron el día miércoles 20 de abril, para las cuales se detallan las coordenadas y códigos de muestras en la Tabla 3.10.

En la Tabla 3.11 se detallan las coordenadas y códigos de muestras para las matrices de agua superficial y agua subterránea. Las muestras de agua superficial se obtuvieron el 20 de abril de 2016, pero en esta fecha en el punto RPAS04 no se encontró agua para tomar la muestra, la cual fue recolectada hasta la fecha 01 de junio de 2016. Las muestras de agua subterránea (pozos) se recolectaron en dos fechas, el 20 y 27 de abril del año 2016.

Tabla 3. 10. Puntos seleccionados para muestras de matriz de sedimento de río.

Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert*		Código de muestra
			XLamb	YLamb	
<b>RPSE01</b>	13°34.550' N	89°39.711' W	427535.48	273000.62	SEDRIO01
<b>RPSE02</b>	13°34.494' N	89°34.694' W	428378.97	272965.65	SEDRIO02
<b>RPSE03</b>	13°34.290' N	89°40.006' W	428398.49	272864.15	SEDRIO03
<b>RPSE04</b>	13°33.780' N	89°40.265' W	427455.40	272306.32	SEDRIO04

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

El muestreo de biomasa (cultivos) y suelos se realizó el día miércoles 25 de mayo de 2016. Para los cuales se presentan en la Tabla 3.12 las coordenadas y códigos de muestras.

Las Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 presentan la ubicación de las muestras obtenidas para agua superficial, aguas de pozos, sedimento de río, cultivos y suelos, con el código de seguimiento respectivo.

Se presentan los datos obtenidos para las diferentes matrices durante los muestreos.

Tabla 3. 11. Puntos seleccionados para muestras de matrices de agua superficial y agua subterránea.

Punto	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert*		Código de muestra	T °C	Oxígeno Disuelto %	Oxígeno Disuelto mg/L	Conductividad µS/cm	Sólidos Totales Disueltos mg/L	pH	Cloruros mg/L
			XLamb	YLamb								
RPAS01	13°34.550' N	89°39.711' W	427535.48	273000.62	H2ORIO01	29.7	65.0	4.85	682.0	0.4485	7.05	142.00
RPAS02	13°34.494' N	89°34.694' W	428378.97	272965.65	H2ORIO02	28.8	75.5	5.49	497.0	0.3380	6.62	139.99
RPAS03	13°34.290' N	89°40.006' W	428398.49	272864.15	H2ORIO03	28.7	91.2	6.45	482.0	0.2944	6.59	95.12
RPAS04	13°33.780' N	89°40.265' W	427455.40	272306.32	H2ORIO04	29.4	98.1	7.14	385.6	0.3912	6.59	189.79
POZO02	13°34.696' N	89°39.474' W	428799.60	273115.72	H2OPOZ01	28.9	65.0	4.90	475.0	0.3120	6.33	98.30
POZO04	13°34.466' N	89°40.046' W	427766.76	272694.42	H2OPOZ02	29.0	84.0	6.23	386.9	0.2529	6.07	77.04
POZO05	13°34.264' N	89°40.253' W	427392.36	272323.09	H2OPOZ03	29.9	48.4	3.61	858.0	0.5590	5.98	673.42
POZO07	13°34.003' N	89°40.420' W	427089.71	271842.70	H2OPOZ04	30.5	45.1	3.31	345.7	0.2256	5.92	61.99
POZO09	13°34.811' N	89°39.821' W	428174.35	273329.41	H2OPOZ05	28.8	60.4	4.63	422.9	0.2717	5.68	63.38
POZO10	13°34.257' N	89°40.241' W	427413.96	272310.09	H2OPOZ06	28.9	54.0	4.13	730.0	0.4810	6.09	324.85
POZO11	13°34.242' N	89°40.241' W	427413.89	272282.43	H2OPOZ07	28.2	37.3	2.88	554.0	0.3575	5.90	299.79
POZO12	13°34.257' N	89°40.148' W	427581.71	272309.62	H2OPOZ08	29.3	50.3	3.70	430.8	0.2795	6.01	57.69
POZO13	13°34.201' N	89°39.977' W	427889.86	272205.55	H2OPOZ09	29.0	43.5	3.27	484.0	0.3120	6.05	364.22
POZO15	13°34.136' N	89°40.003' W	427842.56	272085.76	H2OPOZ10	29.6	40.7	3.03	709.0	0.4680	6.05	540.30
POZO16	13°33.830' N	89°40.508' W	426930.16	271524.10	H2OPOZ11	29.6	24.6	1.86	388.9	0.2457	6.10	44.92

\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 12. Puntos seleccionados para muestreo de matrices de suelo y biomasa.

Punto	Coordenadas		Coordenadas Forma Cónica conformal de Lambert**		Codigo de muestras	Ph	Tipo de suelo	Profundidad de muestra de suelo
			XLamb	YLamb				
CULT04/ SUEL06	13°34.150' N	89°40.016' W	427820.17	272112.28	SUELOA01	6.5	Franco arcilloso-arcilloso.	0-25 cm
CULT04/ SUEL06	13°34.150' N	89°40.016' W	427820.17	272112.28	BICAÑA01/SUELOA02	6.5	Franco arcilloso-arcilloso	0-25cm
	13°34.163' N	89°40.028' W	427798.47	272136.21				0-20cm
	13°34.134' N	89°40.062' W	427737.00	272082.82				0-25cm
CULT04/ SUEL06	13°34.079' N	89°40.083' W	427699.03	271981.57	BICAÑA02/SUELOA03	6.5	Franco arcilloso-arcilloso	0-26cm
	13°34.101' N	89°40.102' W	427664.68	272022.07				0-25cm
	13°34.143' N	89°40.190' W	427505.58	272099.39				0-27cm
CULT07/ SUEL09	13°34.383' N	89°40.153' W	427572.48	272541.22	BICAÑA03/SUELOA04	NM*	NM*	0-27cm
	13°34.380' N	89°40.077' W	427709.88	272535.69				0-24cm
	13°34.378' N	89°39.998' W	427852.71	272532.01				0-25cm
CULT07/ SUEL09	13°34.477' N	89°40.028' W	427798.47	272714.27	BICAÑA04/SUELOA05	NM*	NM*	0-20cm
	13°34.515' N	89°39.948' W	427943.11	272784.22				0-28cm
	13°34.483' N	89°39.850' W	428120.28	272725.31				0-25cm
CULT09/ SUEL11	13°34.254' N	89°40.253' W	427391.68	272303.74	BIAYOT03/SUELOA08	6.9	NM*	0-25cm
CULT10/ SUEL12	13°34.259' N	89°40.013' W	427825.59	272312.94	BICAÑA05/BIAYOT01/ SUELOA06	7.0	Franco arcilloso-arcilloso	0-31cm
CULT11/ SUEL13	13°33.851' N	89°40.155' W	427568.86	271561.84	BIAYOT02/SUELOA07	NM*	NM*	0-26cm
SUEL04	13°34.373' N	89°40.189' W	427507.39	272522.81	SUELOA09	NM*	NM*	0-24cm
SUEL05	13°34.228' N	89°40.275' W	427351.91	272255.87	SUELOA10	NM*	NM*	0-30cm

NM\*: No se realizó la medición.

\*\*Datum norteamericano de 1927, Esferoide de Clarke de 1866.

Fuente: Elaboración propia.

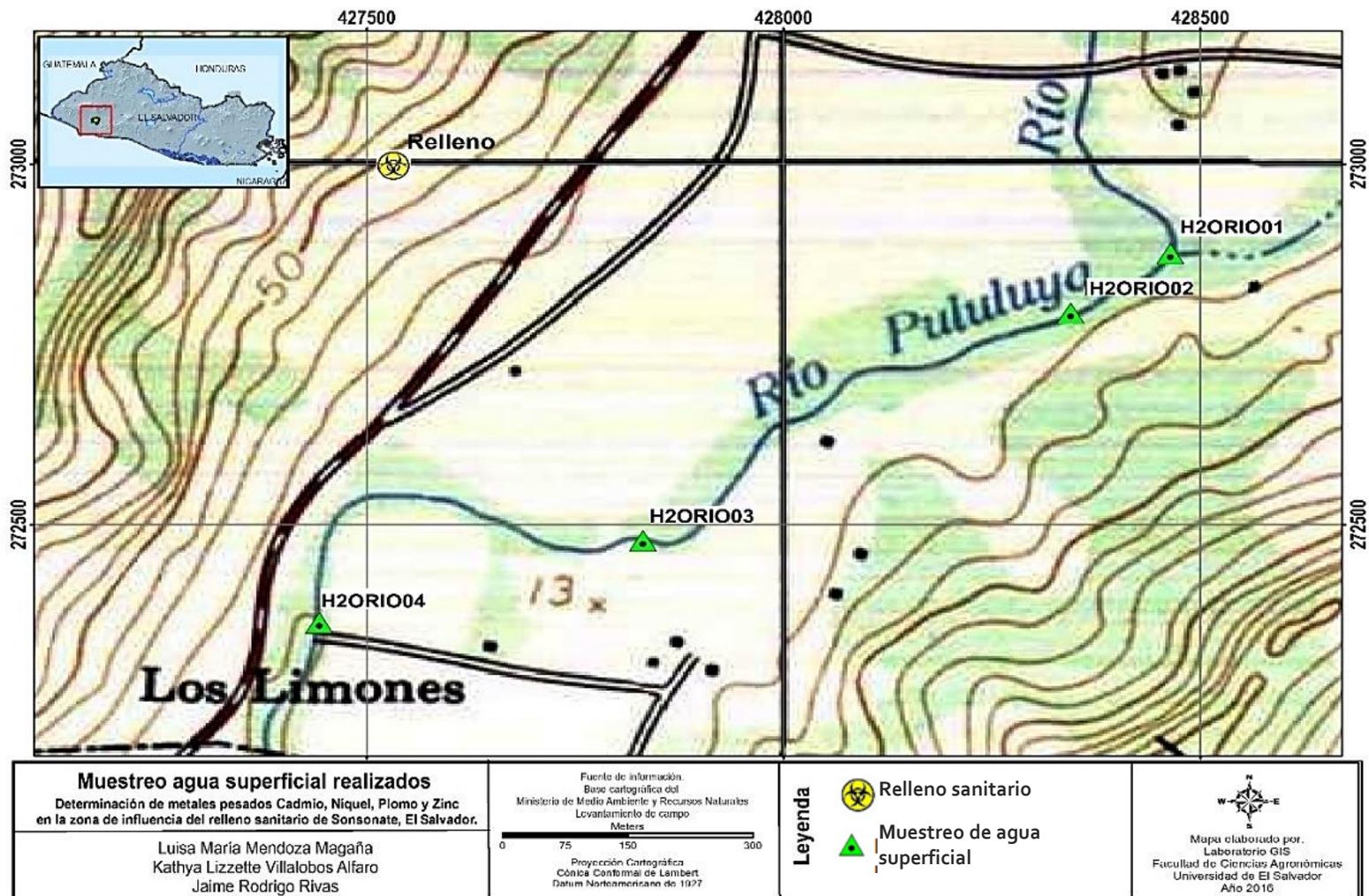


Figura 3. 1. Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de agua superficial en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS.

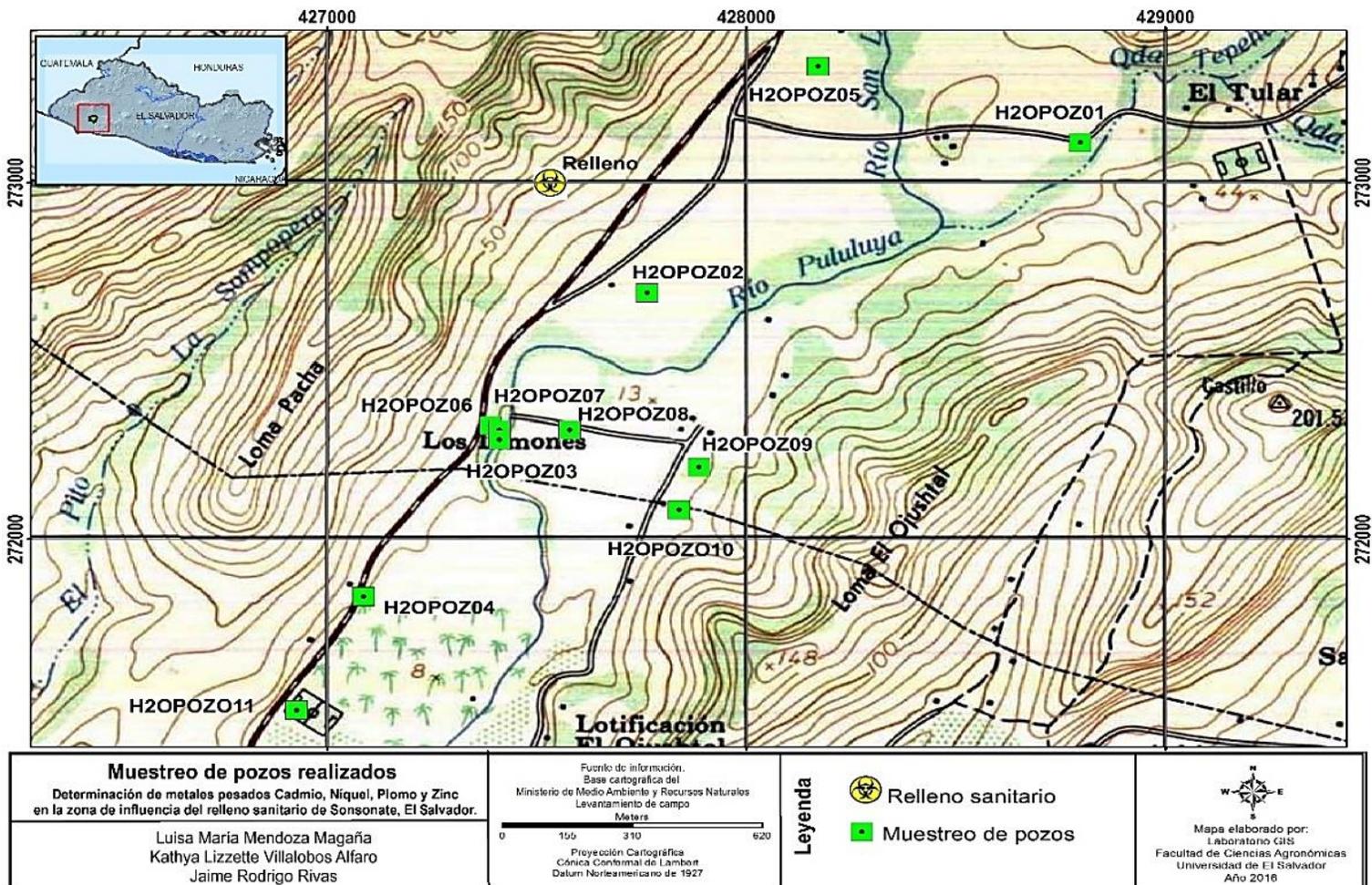


Figura 3. 2. Mapa de ubicación de puntos de muestreados en matriz de agua subterránea (pozos) en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS.

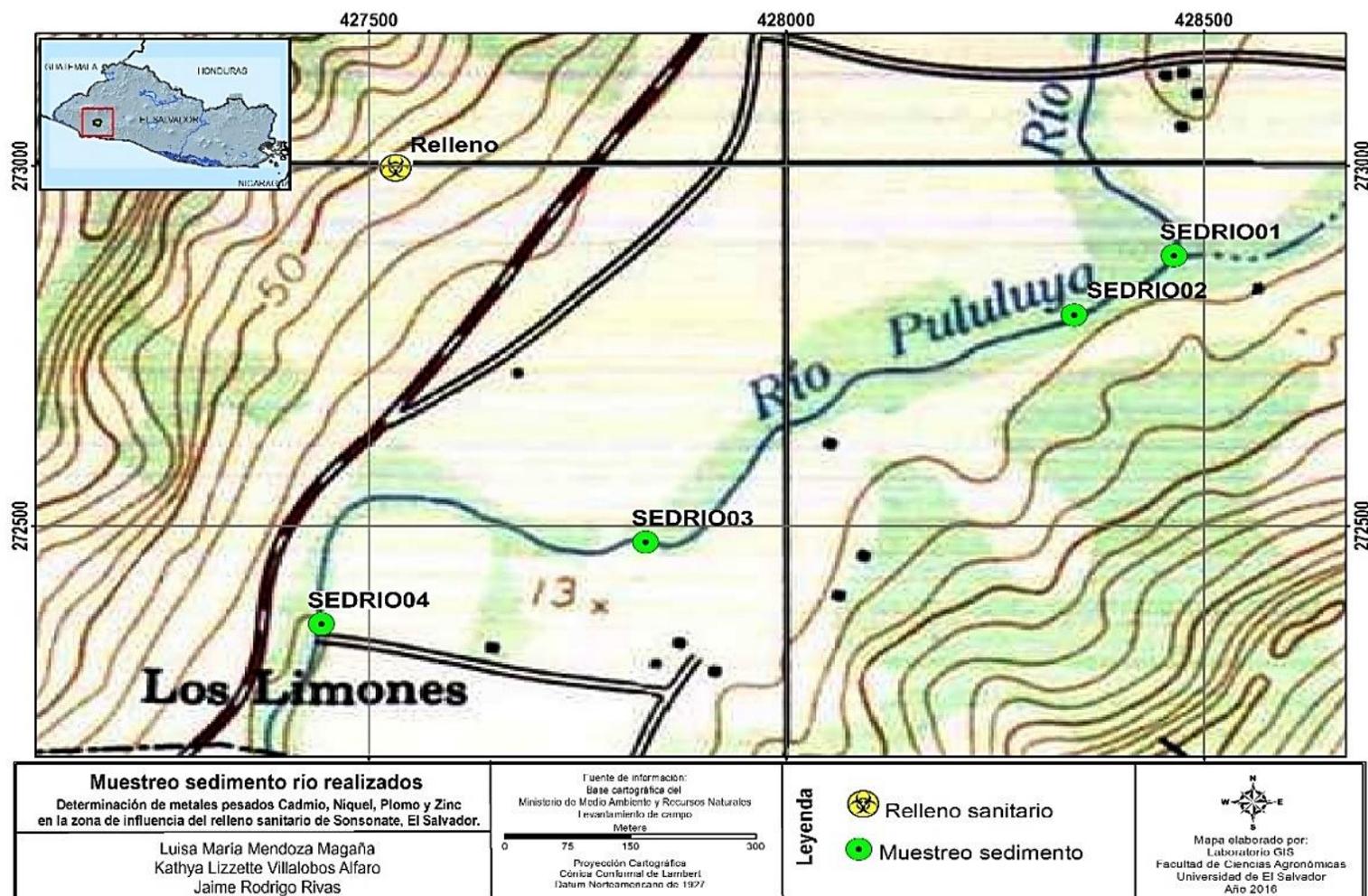


Figura 3. 3. Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de sedimento en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS.

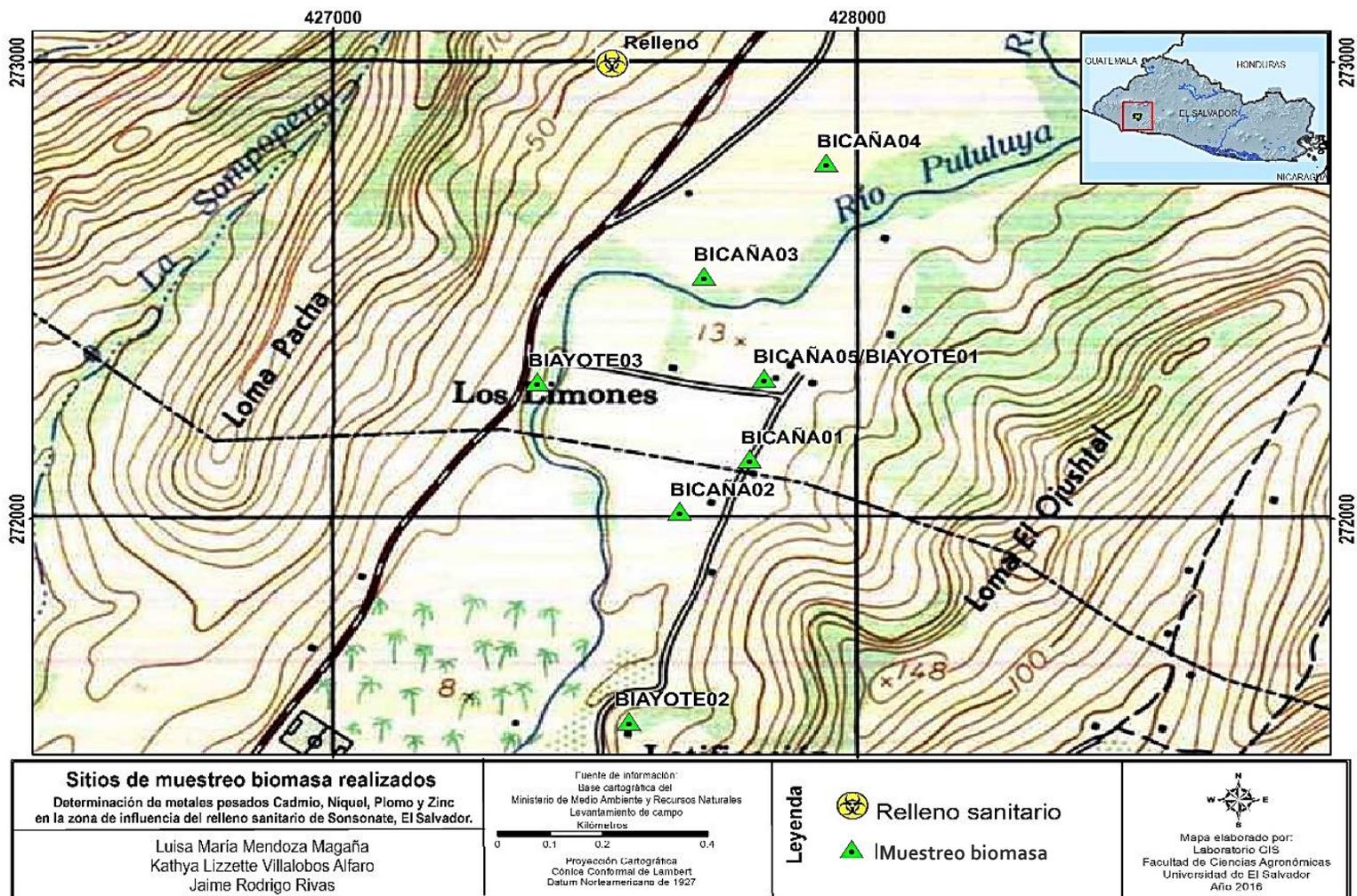


Figura 3. 4. Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de biomasa en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS.

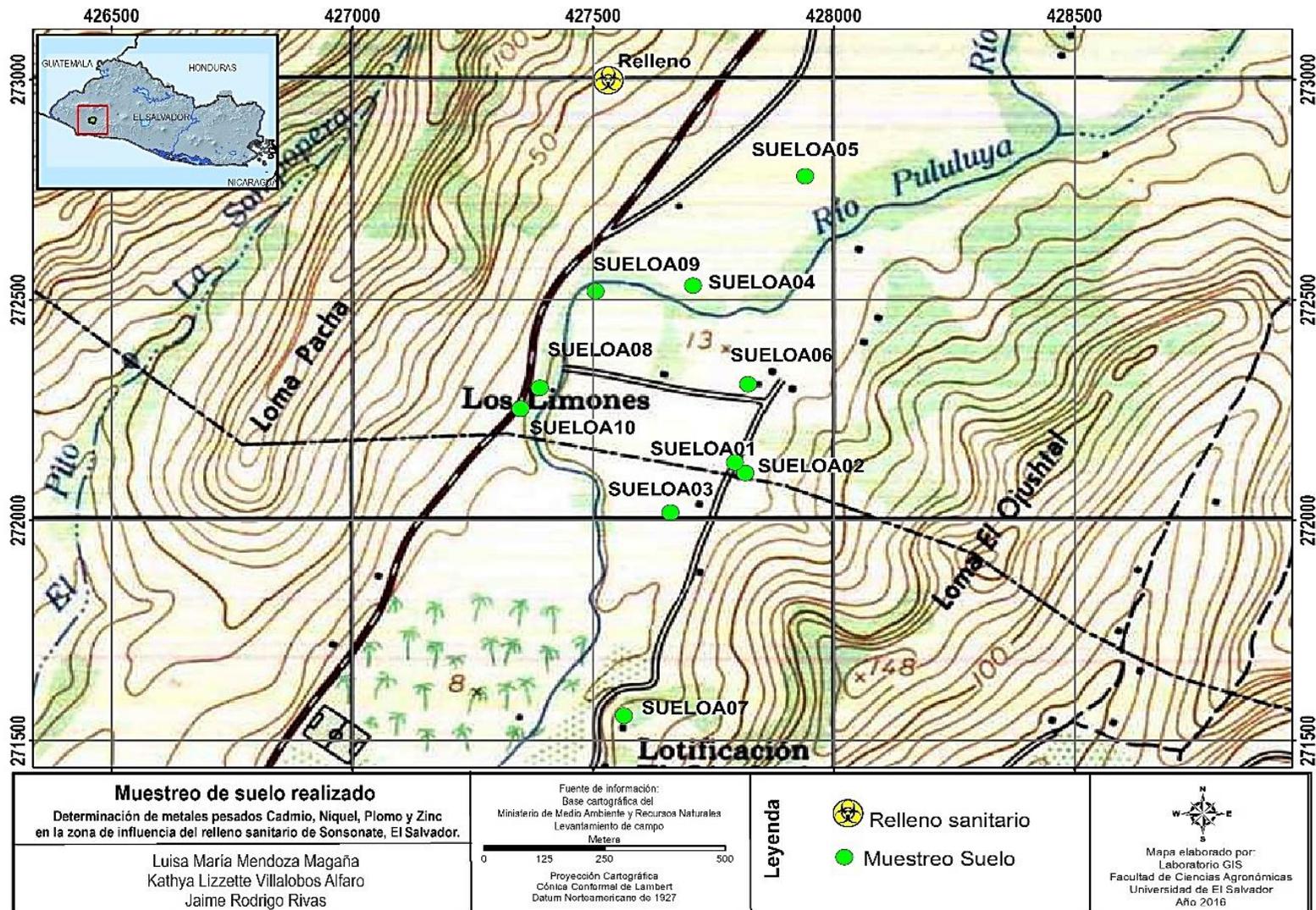


Figura 3. 5. Mapa de ubicación de puntos seleccionados en matriz de suelo en zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS

Se presenta en la Figura 3.6 el consolidado final de ubicación de todas las muestras que fueron recolectadas para la investigación en la zona de influencia del relleno sanitario de la región Metropolitana de Sonsonate.

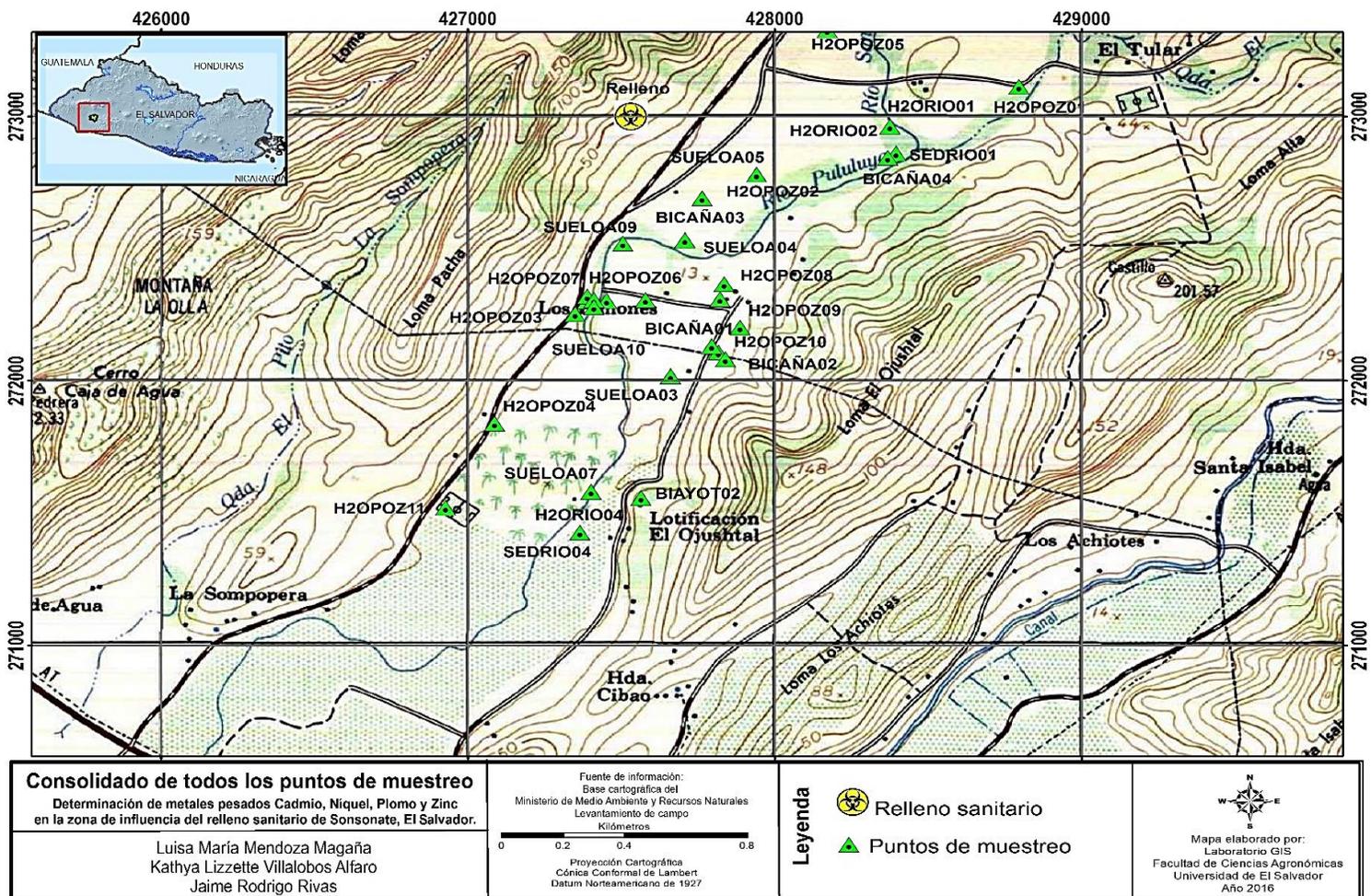


Figura 3. 6. Mapa de ubicación de todas las muestras seleccionadas que fueron recolectadas en zonas de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. Fuente: Elaboración propia por medio del programa ArcGIS.

### 3.6. METODOLOGÍA DE DIGESTIÓN DE MUESTRAS

Con el fin de analizar las muestras por las técnicas de fluorescencia de rayos X por reflexión total y espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito, se realizó un proceso de pretratamiento para llevar las muestras al estado líquido, en esta ocasión se utilizó una digestión ácida. A continuación, se detalla el procedimiento que se siguió para ello.

#### 3.6.1. LAVADO DE CRISTALERIA EN EL LABORATORIO

Ver en Anexo 10, el procedimiento necesario de lavado de cristalería que se aplicó en la investigación.

#### 3.6.2. DIGESTIÓN DE MATRICES DE AGUA SUPERFICIAL Y AGUA SUBTERRÁNEA

El método que se siguió es una digestión ácida con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$ , basada en el método EPA 3005 A, digestión ácida de aguas para el análisis de metales totales recuperables o disueltos. Este método se aplicó para digestión de muestras de agua que fueron analizadas por fluorescencia de rayos X por reflexión total y espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito. Los metales que pueden ser determinados con este método son los que se incluyen en la Tabla 3.13:

Tabla 3. 13. Metales que pueden determinarse en matrices de agua.

Aluminio	Magnesio	Selenio
Antimonio	Manganeso	Plomo
Arsénico	Molibdeno	Zinc
Bario	Níquel	Hierro
Berilio	Potasio	Vanadio
Cadmio	Selenio	Cobre
Calcio	Plata	Talio
Cromo	Sodio	Cobalto

Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1992). *Método 3005A. Digestión ácida de aguas para el análisis de contenido total de metales recuperables o disueltos por espectroscopia ICP o FLAA.*

Los materiales, equipo, reactivos y procedimientos necesarios utilizados para la digestión de matrices de agua superficial y agua subterránea se detallan en el Anexo 11.

### 3.6.3. DIGESTIÓN DE MATRICES DE SUELO Y SEDIMENTO

Para el procedimiento de digestión se utilizó el método de la EPA 3050B sobre digestión ácida para sedimentos, lodos y suelos. Este método es un procedimiento de digestión ácida usado para preparar sedimentos, lodos, y muestras de suelo para el análisis espectroscopia de absorción atómica por llama o en horno (FLAA y GFAA, respectivamente). Los metales que pueden determinarse con este método se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Metales que pueden determinarse en matrices de suelo y sedimentos.

AA por Flama		AA Horno Grafito
Aluminio	Magnesio	Arsénico
Bario	Manganeso	Berilio
Berilio	Molibdeno	Cadmio
Cadmio	Níquel	Cromo
Calcio	Osmio	Cobalto
Cromo	Potasio	Hierro
Cobalto	Plata	Plomo
Cobre	Sodio	Molibdeno
Hierro	Talio	Selenio
Plomo	Vanadio	Talio

Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*

Los materiales, equipo, reactivos y procedimientos necesarios utilizados para la digestión de matrices de suelo y sedimento se detallan en el Anexo 12.

### 3.6.4. DIGESTIÓN DE MATRICES DE BIOMASA

El método que se utilizó para el pretratamiento fue el propuesto por la FAO (Motsara y Roy, 2008) que es aplicable para varias matrices. El método se aplicó para el análisis de cultivos, luego se procedió a una digestión ácida vía ácida según el método EPA 3050B, haciendo uso de HNO<sub>3</sub> y peróxido de hidrogeno. Los materiales, equipo, reactivos y procedimientos necesarios utilizados para la digestión de matriz de biomasa se detallan en el Anexo 13.

### **3.7. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS**

Después de haber realizado todo el pre tratamiento necesario para la conservación y digestión de las muestras, se procedió a la determinación de las diferentes concentraciones de los metales antes mencionados; para ello fue necesario el análisis por dos tipos diferentes técnicas.

Inicialmente las muestras de diferentes matrices fueron analizadas por fluorescencia de rayos X por reflexión total, se utilizó esta técnica semi cuantitativa, con el fin de identificar la presencia de Cd, Ni, Zn y Pb; posteriormente se analizaron las muestras seleccionadas a través de la técnica de absorción atómica por horno de grafito, dado que este posee un nivel de detección más alto que las otras técnicas (Véase Anexo 14). A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para cada técnica.

#### **3.7.1. TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL**

Para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total, el equipo que se utilizó fue de análisis de TXRF con excitación por tubo de Rayos X. del Centro de Investigación y Aplicaciones Nucleares (CIAN-FIA-UES), el cual cuenta con un generador de rayos X marca SIEMENS modelo KRISTALOFLEX 760, con un tubo de rayos X, con ánodo de Molibdeno; los espectros son adquiridos en el sistema de espectrometría de rayos X, constituido por un detector de Silicio activado con Litio, con ventana de Berilio y su electrónica asociada; y almacenados en una PC mediante el software Aptec.

La técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total se utilizó para el análisis semi-cuantitativo de las muestras, para esto, se requirió de una serie de pasos cuyo objetivo fue acondicionar la muestra y la preparación del equipo.

##### **I. Adición de estándar interno a las muestras.**

Con el objetivo de disminuir los efectos debido a las variaciones en la configuración geométrica y a la ubicación de cada muestra en el cuarzo (porta muestra) y detector del

equipo, se agregó a las muestras ya digeradas una solución patrón de Galio “estándar interno”.

Las muestras fueron enriquecidas con una concentración de Galio de 3 ppm y 5 ppm, siendo estas concentraciones valores aproximados a los esperados para los metales pesados analizados en las diferentes matrices. El procedimiento que se siguió para la elaboración de las soluciones patrón de 3 ppm de Galio y 5 ppm de Galio se detalla en la Figura 3.7 y Figura 3.8 respectivamente.

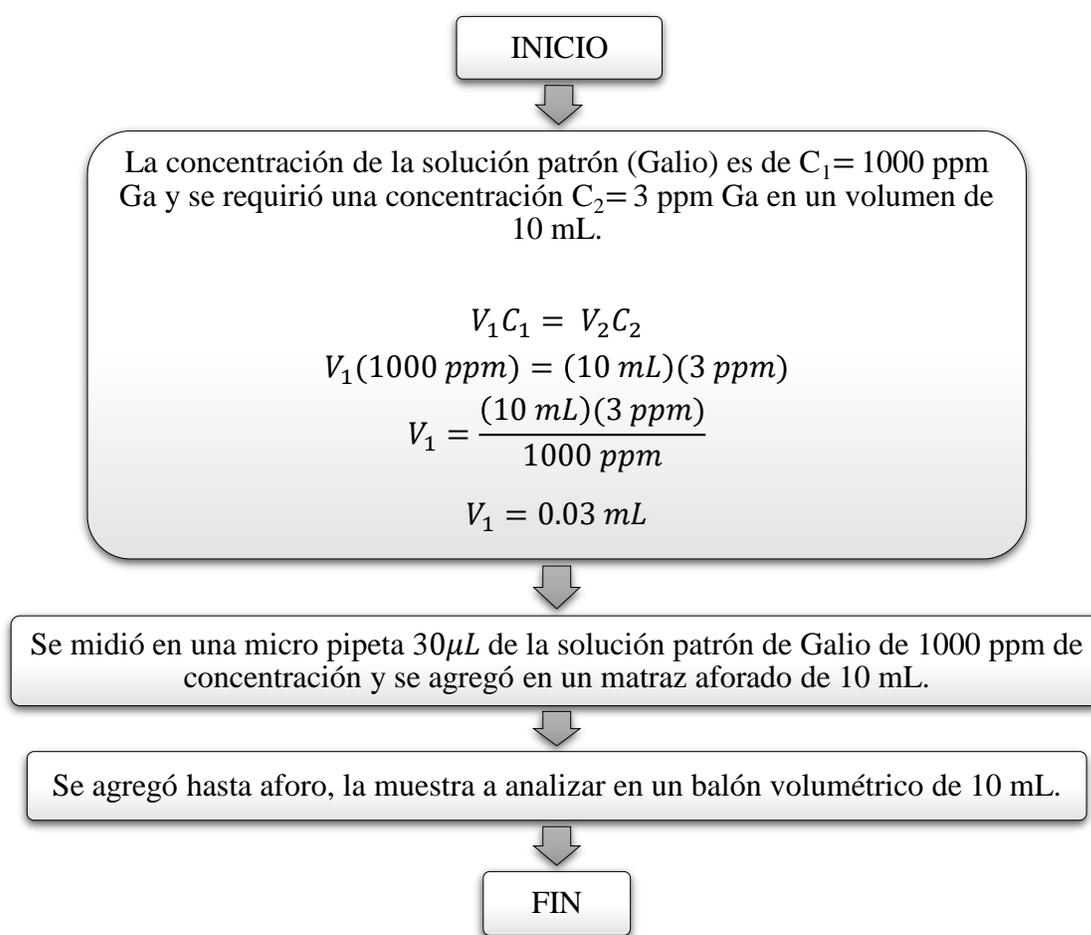


Figura 3. 7. Procedimiento realizado para la elaboración de la solución patrón de 3 ppm de Galio a partir de un estándar de 1000 ppm de Galio. Fuente: Elaboración propia.

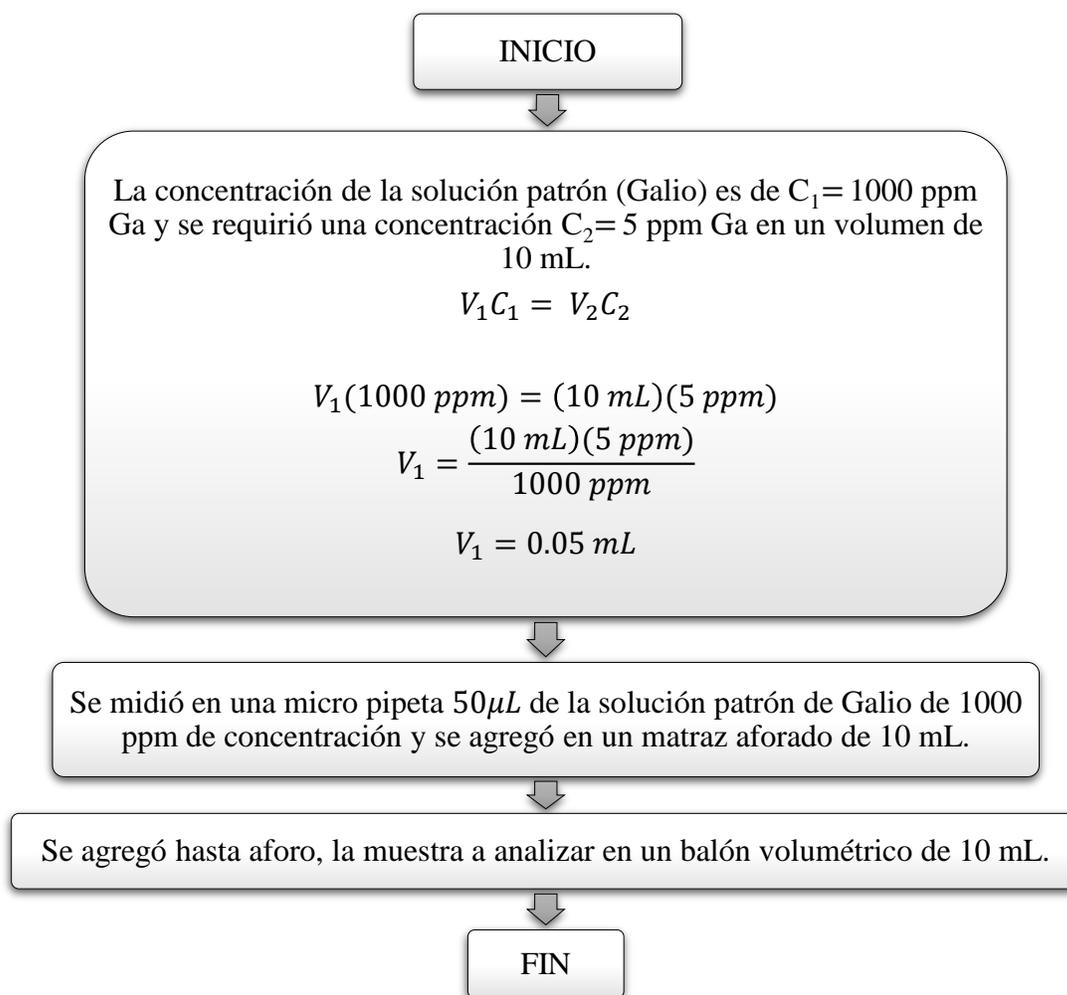


Figura 3. 8. Procedimiento realizado para la elaboración de la solución patrón de 5 ppm de Galio a partir de un estándar de 1000 ppm de Ga. Fuente: Elaboración propia.

II. Lavado de cuarzo para análisis por fluorescencia de rayos X por reflexión total.

En el análisis por fluorescencia de rayos X por reflexión total, el cuarzo se utilizó como porta muestra, este debía estar totalmente limpio y con una superficie lo más lisa posible, para no repercutir en fallas durante el análisis. Dado la importancia del cuidado del porta muestras, se siguió un protocolo de limpieza, el cual, se detalla en la Figura 3.9.



Figura 3. 9. Procedimiento de lavado de cuarzo para el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (1997). *Limpieza de los reflectores de muestra*. Muestreo, almacenamiento de las muestras y procedimientos de preparación para Fluorescencia de Rayos X, análisis de los materiales de entorno. Viena.

### III. Preparación de estándares para la obtención de curvas de calibración.

Para la curva de calibración se prepararon soluciones patrón del multi-elemento de concentración 1000 ppm que contiene: Plata (Ag), Aluminio (Al), Boro (B), Bario (Ba), Bismuto (Bi), Calcio (Ca), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Galio (Ga), Indio (In), Potasio (K), Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeso (Mn), Sodio (Na), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estroncio (Sr), Talio (Tl), Zinc (Zn), a concentraciones de 1 y 5 ppm de cada uno de los elementos. La preparación de los estándares de multi-elemento para la obtención de curvas de calibración se detalla en la Figura 3.10.

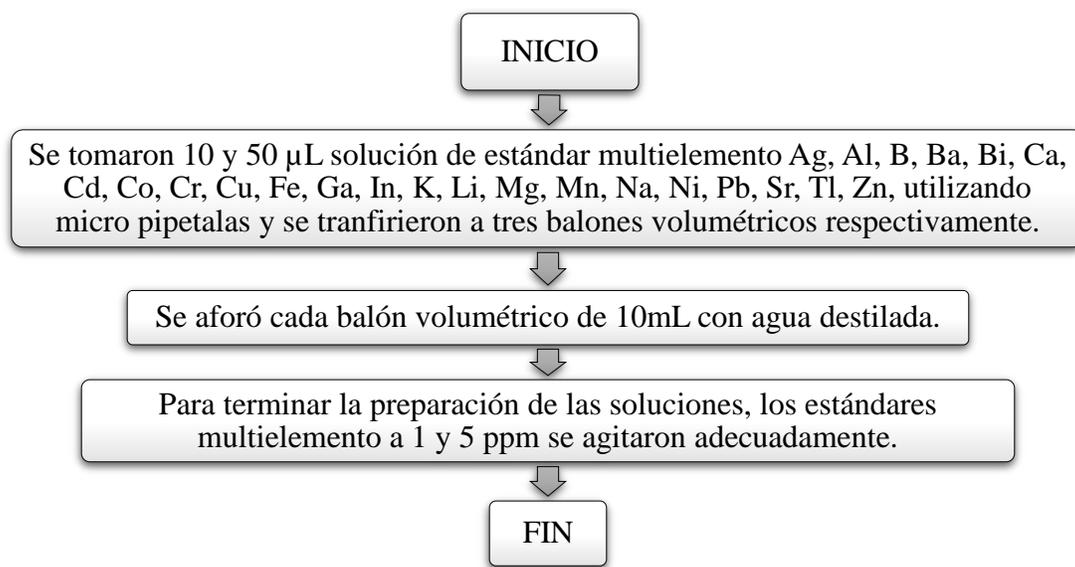


Figura 3. 10. Procedimiento realizado para la preparación de estándares de multi-elemento para la obtención de curvas de calibración. Fuente: Elaboración propia.

#### IV. Calibración de equipo en voltaje y amperaje.

El equipo se calibró antes de ser utilizado, para esto se siguió un protocolo de calibración indicado por el manual del equipo (el tiempo de calibración depende del tiempo que el equipo tiene de no ser utilizado), ver procedimiento detallado en Anexo 15.

#### V. Metodología de obtención de espectros.

La obtención de espectros se realizó para las siguientes soluciones:

- a. Estándares multi-elemento para la generación de curva de calibración.
- b. Muestras de las diferentes matrices, digestadas y enriquecidas con el estándar interno de Galio (Ga).

Para los estándares multi-elemento y las muestras de diferentes matrices el procedimiento seguido fue el mismo, en el caso del porta muestras se obvió la parte de adición del analito; el procedimiento es detallado en el Anexo 16 y Anexo 17 respectivamente. Los certificados de estándares de Galio y multielemento se presentan en Anexo 18 y 19 respectivamente. De

forma generalizada la metodología que se siguió para la obtención de espectros se detalla en la Figura 3.11.

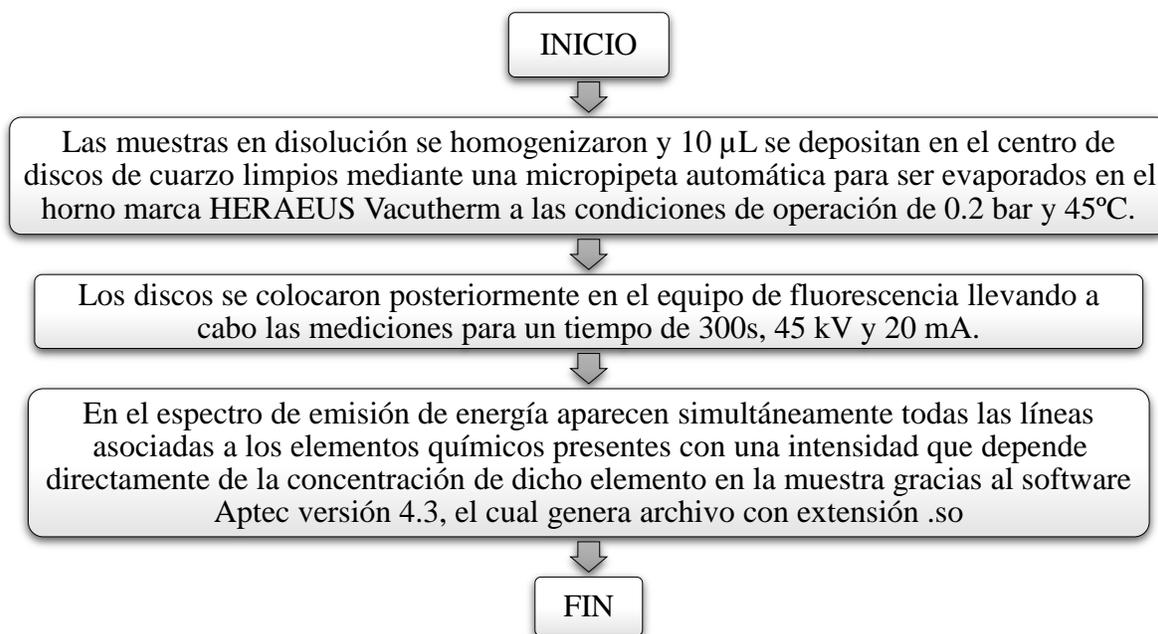


Figura 3. 11. Procedimiento para la obtención de espectros por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Cuadra Zelaya, C. D. y Romero García, D. A. (2006). *Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el Lago Suchitlan*. Universidad de El Salvador, San Salvador.

#### VI. Metodología de cuantificación de concentraciones para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total y obtención de curvas de sensibilidad para líneas $K\alpha$ .

Luego de obtener los espectros para el estándar multi-elemental para las concentraciones preparadas (1 y 5 ppm) y los espectros de las muestras de diferentes matrices, se procedió a calcular las áreas de los picos presentes en cada espectro, las cuales son equivalentes a las concentraciones de los estándares de los elementos y a las concentraciones de los elementos presentes en la muestra, estos cálculos se realizaron a través del software AXIL-QXAS. En el esquema de la Figura 3.12 se detalla el procedimiento seguido.

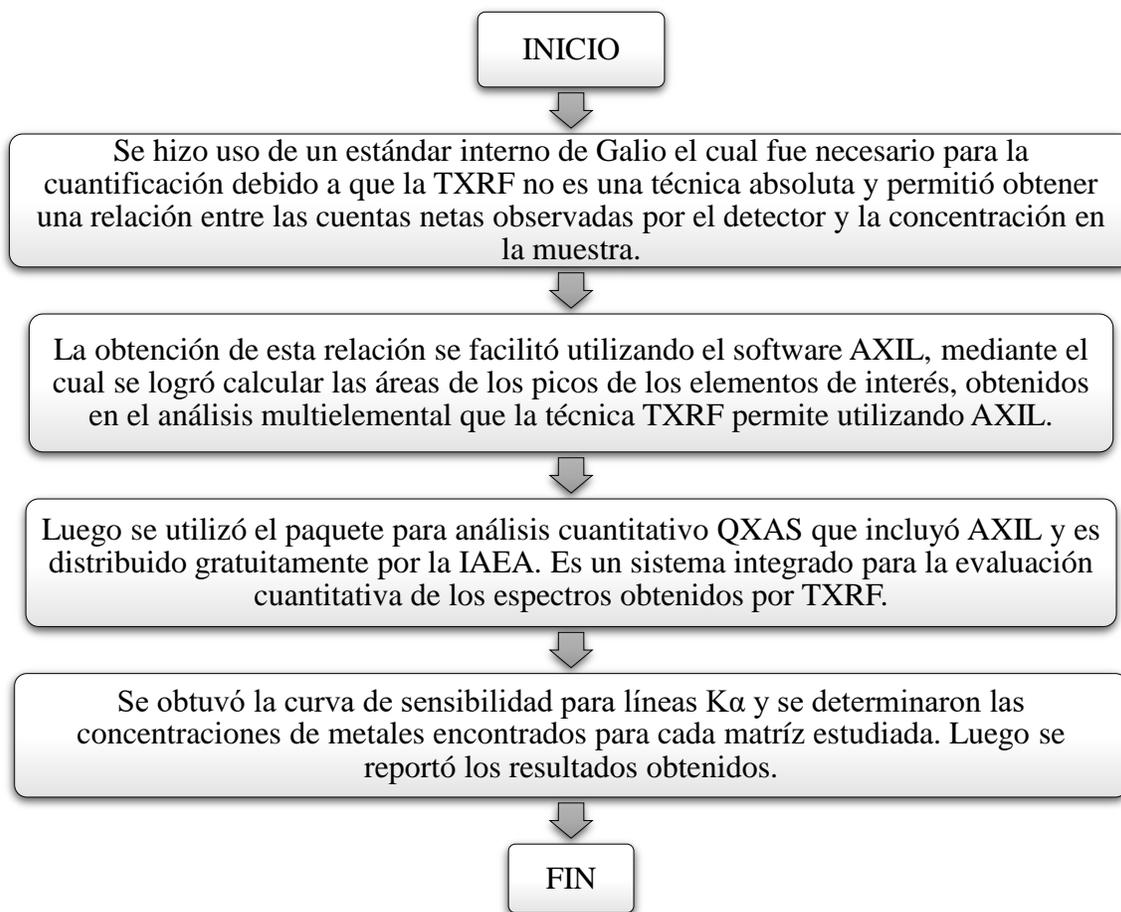


Figura 3. 12. Metodología de cuantificación de concentraciones seguidas para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Cuadra Zelaya, C. D. y Romero García, D. A. (2006). *Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el Lago Suchitlan*. Universidad de El Salvador, San Salvador.

### 3.7.2. TÉCNICA DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO

Debido a la precisión obtenida a través de la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito, esta, se utilizó para el análisis cuantitativo de las muestras. Para la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito el equipo que se utilizó fue un espectrofotómetro de absorción atómica iCE 3000, el cual cuenta con un monocromador tipo Eschelle, el tipo de lámpara de carrusel es lámpara codificada de auto

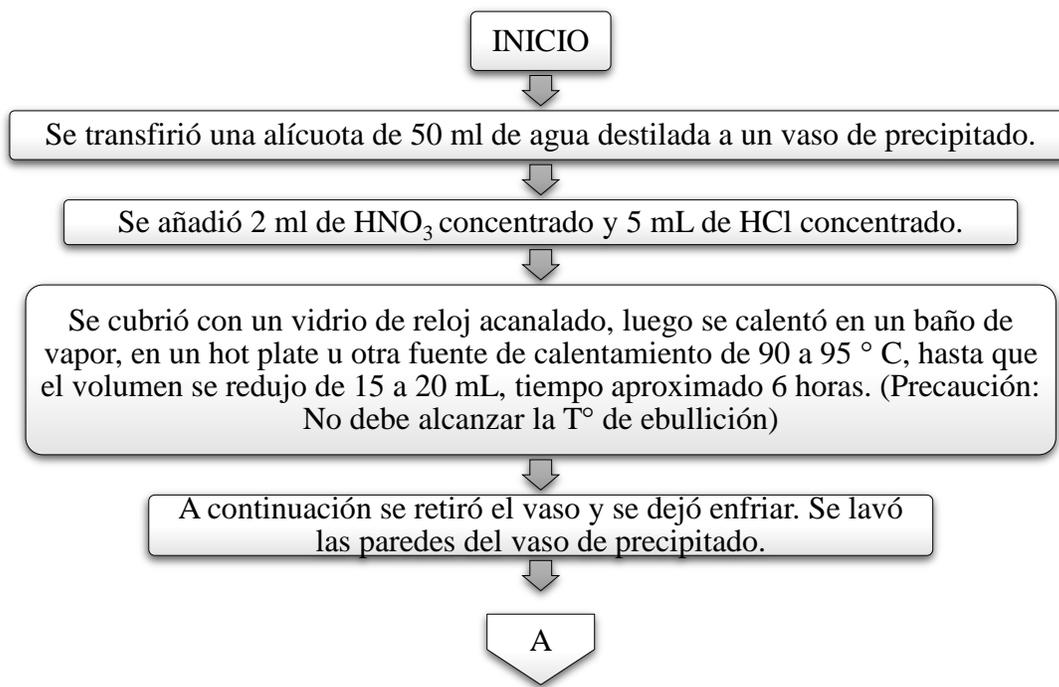
alineación, horno atomizador GFS35 y con correcciones de fondo del tipo de línea cuádruple garantizada de deuterio o sistemas de CA Zeeman.

Para el análisis, se requirió de una serie de pasos para establecer el estado óptimo del equipo y así obtener resultados representativos, tal como se detallan:

- I. Preparación de las soluciones de blanco para matrices de agua, sedimento, suelo y biomasa.

Con el fin de realizar una cuantificación más representativa, el equipo de espectroscopia de absorción atómica por horno de grafito requirió fijar el cero de absorbancia para lo cual fue necesario la utilización de soluciones blanco.

Para las soluciones blanco fue necesario el procedimiento de digestión sin incluir las muestras, esto con el fin de descartar cualquier interferencia que pueda tenerse en la absorbancia de las muestras. El procedimiento seguido para la preparación de las soluciones blanco para matrices de agua, suelo, sedimento y biomasa se detalla en la Figura 3.13 y Figura 3.14.



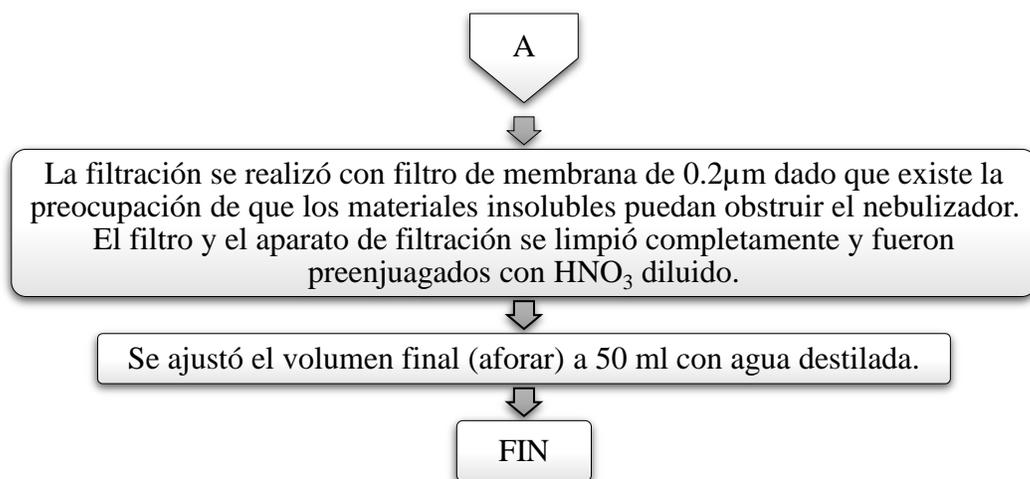
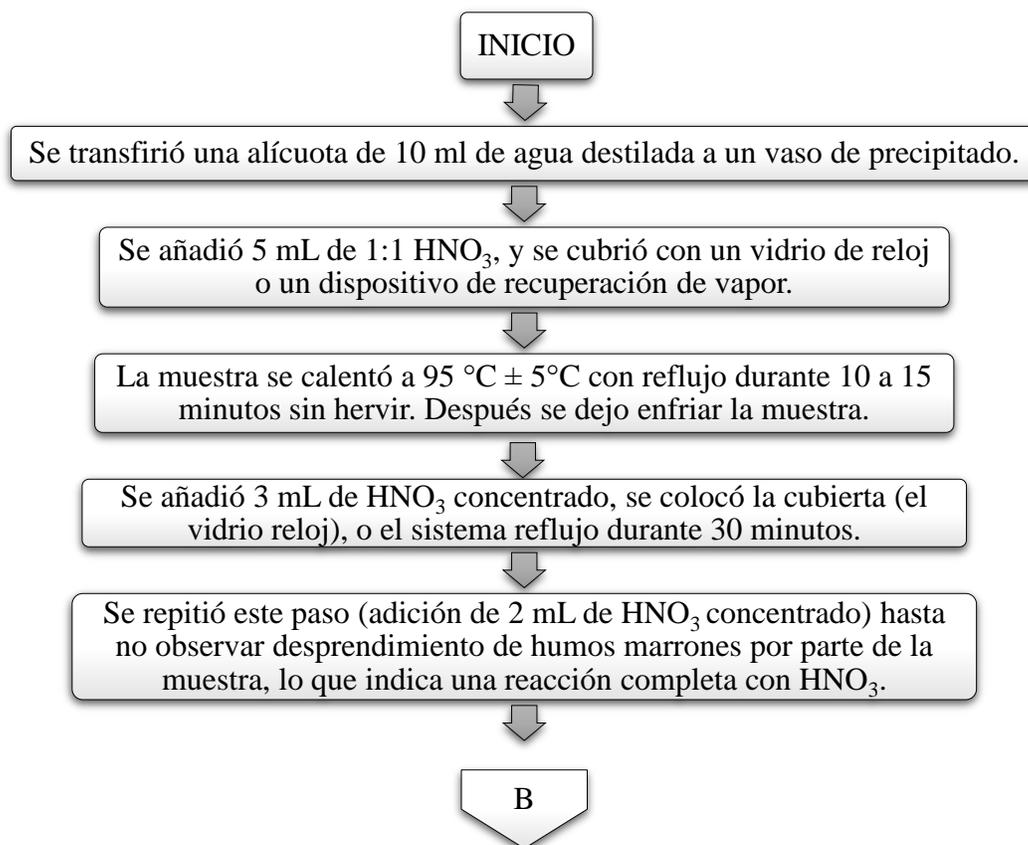


Figura 3. 13. Procedimiento realizado para la preparación del blanco utilizado en la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para matrices de agua superficial y agua subterránea. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1992). *Método 3005A. Digestión acida de aguas para el análisis de contenido total de metales recuperables o disueltos por espectroscopia ICP o FLAA.*



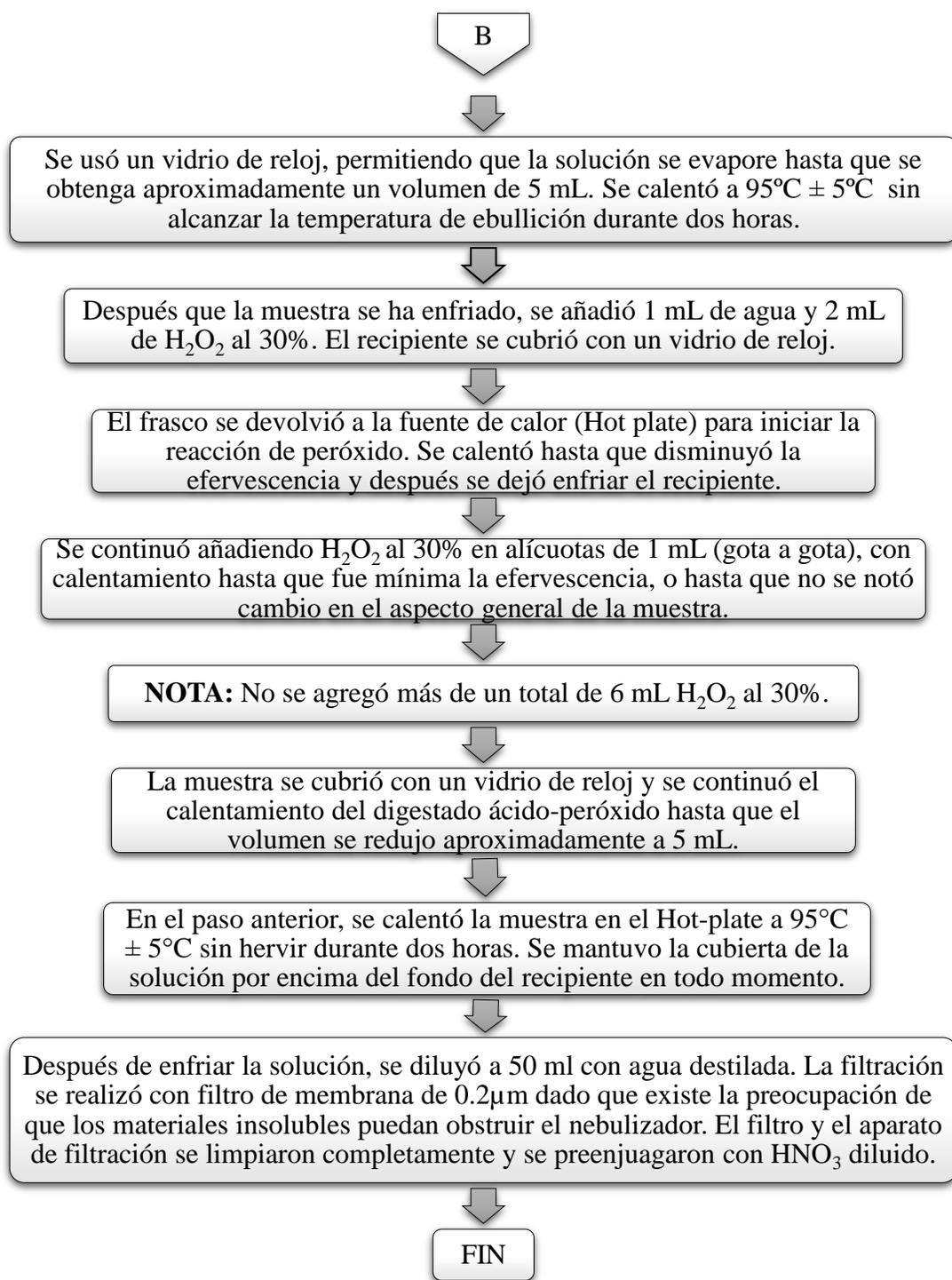


Figura 3. 14. Procedimiento realizado para la preparación del blanco utilizado en la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para matrices de suelo, sedimento y biomasa. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*

## II. Establecimiento del límite de detección del método.

El método del equipo de espectroscopia de absorción atómica por horno de grafito, consistió en el establecimiento del límite inferior de absorbancia, el cual se obtuvo de la absorbancia del blanco para los metales Níquel y Plomo. En relación a los elementos Cadmio y Zinc, no fueron analizados por esta metodología debido a que las lámparas de cátodo hueco para el análisis de dichos metales se encontraron en mal estado. En la Tabla 3.15 se presentan los límites de detección para los diferentes métodos.

Tabla 3. 15. Límites de detección del método para Ni y Pb en matrices de agua superficial, agua subterránea, sedimento, biomasa y suelo; establecidos en base a las lecturas de los blancos.

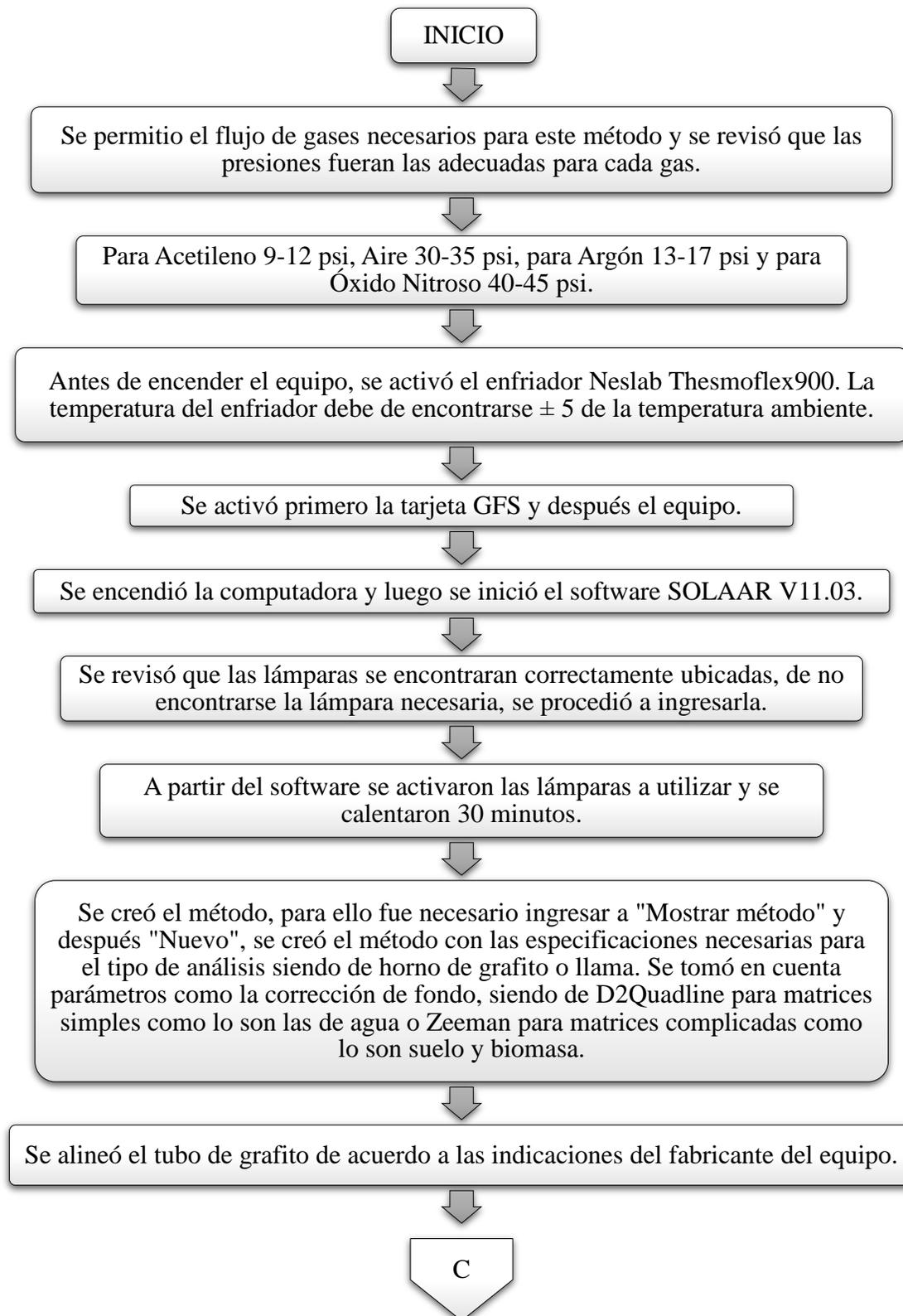
<b>Método</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Absorbancia</b>
Determinación de Ni para matrices de agua.	0.021	0.036	<b>0.029</b>
Determinación de Pb para matrices de agua.	0.041	0.042	<b>0.042</b>
Determinación de Ni para matrices de sedimento, biomasa y suelo.	0.105	0.039	<b>0.072</b>
Determinación de Pb para matrices de sedimento, biomasa y suelo.	0.027	0.026	<b>0.027</b>

Fuente: Elaboración propia.

Identificados los valores de absorbancia de los blancos para cada uno de los métodos, se estableció este valor de absorbancia como límite inferior, valores menores a estos presentarían resultados negativos. Y su concentración se aproximó a 0.0000 ppm para Níquel y Plomo.

## III. Metodología de análisis de matrices por la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito y calibración del equipo.

Después de realizar los procedimientos previos, se procedió a la utilización del equipo Espectrómetro iCE-3000 para la cuantificación de los metales Ni y Pb en las diferentes matrices, para esto se siguió el procedimiento descrito en la Figura 3.15.



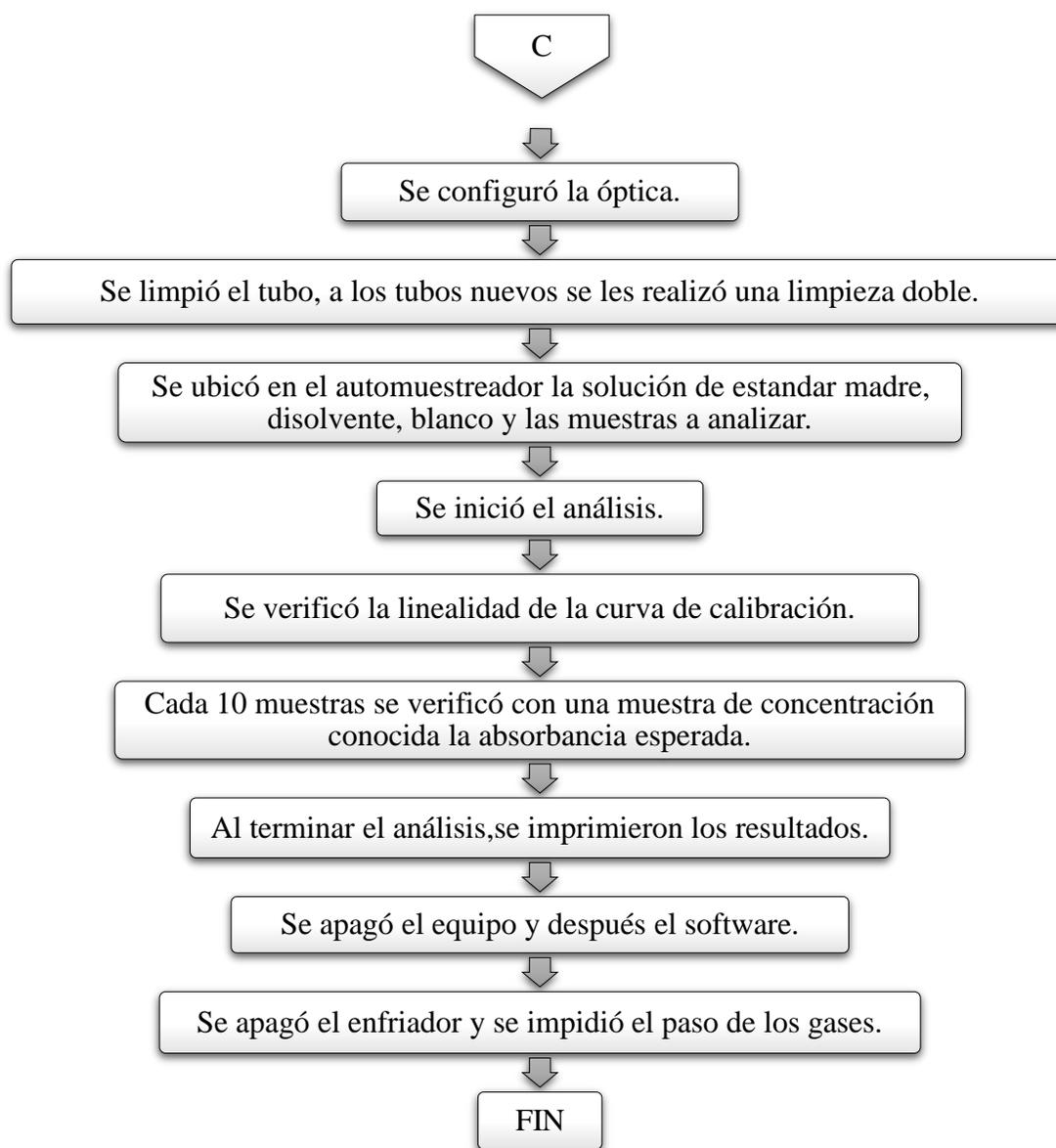


Figura 3. 15. Metodología de análisis de matrices por la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito realizada con el equipo Espectrómetro iCE-3000. Fuente: Elaboración propia.

### 3.8. COMPARACIÓN CON NORMAS DE REFERENCIA

Las concentraciones obtenidas por la técnica de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito se compararon con los valores presentados en las Tablas de la 3.16 a 3.19. Para ello se utilizaron normativas de referencia, ya que en el país no existen normativas específicas para todas las matrices estudiadas.

Tabla 3. 16. Límites máximos permitidos del metal Cadmio, para cada tipo de matriz.

<b>Matríz</b>	<b>Límite de Cd (ppm)</b>	<b>Norma o Referencia</b>
<b>Suelo</b>	1.4	Canadian Environmental Quality Guidelines.
	1.0	España, Real Decreto.
<b>Sedimento</b>	600.00 - 350.00	Canadian Environmental Quality Guidelines
<b>Agua para agricultura</b>	0.0051	Canadian Environmental Quality Guidelines.
<b>Agua potable</b>	0.003	Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08.
	0.005	Normativa EPA de Cadmio en agua.
<b>Cultivos</b>	0.1	CODEX alimenticio (CODEX STAN 193-1995).

Fuente: Elaboración propia tomando como referencia: 1. Canadian Council of Ministers of The Environment (2015) *Scientific Criteria Document for Canadian Soil Quality Guidelines for The Protection of Environmental and Human Health*. 2. Ministerio de la Presidencia (2005) *Real Decreto 9/25*. España; Ministerio de Salud (2009). 3. *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08*. Segunda actualización. San Salvador, El Salvador. 4. Environmental Protection Agency (2002) *Federal Water Pollution Control Act*. USA; y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y La Agricultura y 5. Organización Mundial de la Salud (2015). *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en Los Alimentos y Piensos CODEX STAN 193-1995*.

Tabla 3. 17. Límites máximos permitidos del metal Níquel, para cada tipo de matriz.

<b>Matríz</b>	<b>Límite de Ni (ppm)</b>	<b>Norma o Referencia</b>
<b>Suelo</b>	45.00	Canadian Environmental Quality Guidelines.
	30.00*	España, Real Decreto.
<b>Sedimento</b>	-	Canadian Environmental Quality Guidelines
<b>Agua para agricultura</b>	0.2	Canadian Environmental Quality Guidelines.
<b>Agua potable</b>	0.02	Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08.
	5	Normativa EPA de Níquel en agua.
<b>Cultivos</b>	-	CODEX alimenticio (CODEX STAN 193-1995).

Fuente: Elaboración propia tomando como referencia: 1. Canadian Council of Ministers of The Environment (2015) *Scientific Criteria Document for Canadian Soil Quality Guidelines for The Protection of Environmental and Human Health*. 2. Ministerio de la Presidencia (2005) *Real Decreto 9/25*. España; Ministerio de Salud (2009). 3. *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08*. Segunda actualización. San Salvador, El Salvador. 4. Environmental Protection Agency (2002) *Federal Water Pollution Control Act*. USA; y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y La Agricultura y 5. Organización Mundial de la Salud (2015). *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en Los Alimentos y Piensos CODEX STAN 193-1995*.

Tabla 3. 18. Límites máximos permitidos del metal Plomo, para cada tipo de matriz.

<b>Matriz</b>	<b>Límite de Pb (ppm)</b>	<b>Norma o Referencia</b>
<b>Suelo</b>	25	Convenio de Basilea.
	70	Canadian Environmental Quality Guidelines.
<b>Sedimento</b>	35.00 - 91.30	Canadian Environmental Quality Guidelines
<b>Agua para agricultura</b>	0.20	Canadian Environmental Quality Guidelines.
<b>Agua potable</b>	0.01	Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08.
	0.015	Normativa EPA de Plomo en agua.
<b>Cultivos</b>	0.1 a 1	CODEX alimenticio (CODEX STAN 193-1995).

Fuente: Elaboración propia tomando como referencia: 1. Ministerio de la Presidencia (2005) *Real Decreto 9/25*. España; Ministerio de Salud (2009). 2. *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08*. Segunda actualización. San Salvador, El Salvador. 3. Environmental Protection Agency (2002) *Federal Water Pollution Control Act*. USA; y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y La Agricultura y 4. Organización Mundial de la Salud (2015). *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en Los Alimentos y Piensos CODEX STAN 193-1995*.

Tabla 3. 19. Límites máximos permitidos del metal Zinc, para cada tipo de matriz.

<b>Matriz</b>	<b>Límite de Zn (ppm)</b>	<b>Norma o Referencia</b>
<b>Suelo</b>	200.00	Canadian Environmental Quality Guidelines.
	150.00*	España, Real Decreto.
<b>Sedimento</b>	123.00 - 315.00	Canadian Environmental Quality Guidelines
<b>Agua para agricultura</b>	1000.00**	Canadian Environmental Quality Guidelines.
<b>Agua potable</b>	5.00	Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08.
	5.00	Normativa EPA de Zinc en agua.
<b>Cultivos</b>	-	CODEX alimenticio (CODEX STAN 193-1995).

Fuente: Elaboración propia tomando como referencia: 1. Canadian Council of Ministers of The Environment (2015) *Scientific Criteria Document for Canadian Soil Quality Guidelines for The Protection of Environmental and Human Health*. 2. Ministerio de la Presidencia (2005) *Real Decreto 9/25*. España; Ministerio de Salud (2009). 3. *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08*. Segunda actualización. San Salvador, El Salvador. 4. Environmental Protection Agency (2002) *Federal Water Pollution Control Act*. USA; y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y La Agricultura y 5. Organización Mundial de la Salud (2015). *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en Los Alimentos y Piensos CODEX STAN 193-1995*.

**CAPÍTULO 4: ANÁLISIS E  
INTERPRETACIÓN DE  
RESULTADOS.**

#### 4.1. RESULTADOS POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL

En las Tablas 4.1 y 4.2 se presentan los resultados obtenidos por fluorescencia de rayos X por reflexión total siguiendo la metodología para cuantificación de concentración real, a partir de factores de dilución en muestras sólidas. Los espectros generados por el equipo para cada muestra permitieron la semi-cuantificación de las concentraciones, un ejemplo de espectro para cada matriz es presentado en Anexo 20.

Para conocer la concentración real de los metales en cada una de las muestras, fue necesario utilizar factores de dilución; estos únicamente se aplicaron a las muestras en estado sólido (biomasa, sedimento y suelo) y no así para las muestras líquidas, se partió de un volumen de 50 mL durante la etapa de digestión y se finalizó con un volumen de igual valor. Para el cálculo de la concentración tomando en cuenta los factores de dilución se utilizó la ecuación 4.1, que fue tomada del Método Oficial 999.11. de la OAC (1999) en la determinación de Cadmio, Cobre, Hierro, Plomo y Zinc en los alimentos por espectrofotometría de absorción atómica después de calcinación en seco.

$$C = (a - b) \times FD_T \quad \text{Ec. 4. 1.}$$

Donde:

a= concentración en muestra analizada por medio de QXAS/AXIL (mg/L).

b= concentración del blanco (mg/kg).

FD<sub>T</sub> = factor de dilución total.

En el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total, el valor de b se consideró como cero debido a que no se contemplaron blancos para la etapa de digestión, ya que el fin de la técnica en esta investigación fue la identificación semi-cuantitativa. Sin embargo, el blanco de corrección que fue considerado es el efecto generado por el portamuestra de cuarzo, que fue sometido a un proceso de limpieza.

Es importante mencionar que la cubierta del detector del equipo de fluorescencia de rayos X por reflexión total utilizado en esta investigación, está fabricada a base de Níquel, lo que generó presencia de líneas espectrales de Ni al momento de realizar las lecturas, originando una concentración aparente, que no era contenida en la muestra analizada y que debía ser sujeta a corrección.

El factor de dilución se calculó con la ecuación 4.2.

$$FD_T = \frac{V}{m} \quad \text{Ec. 4. 2.}$$

Dónde:

V= volumen de solución analizada (mL)

m = masa de la muestra inicial (g)

Dado que b se consideró como cero, el cálculo de C se simplifica a:

$$C = a \times FD_T \quad \text{Ec. 4. 3.}$$

Se presenta a continuación un ejemplo de cálculo para muestra sólida, correspondiente a SUELO01, para metal Níquel.

$$FD_T = \frac{50 \text{ mL}}{0.5007 \text{ g}} = 99.8601 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

$$C = 0.546 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 99.8601 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

$$C = 54.5236 \frac{\text{mg}}{\text{kg}} = 54.5236 \text{ ppm}$$

Para todas las muestras analizadas por TXRF no se reportaron valores de concentración puntuales para el metal Cadmio, porque se encontraban por debajo del límite de detección del equipo (BLD), el cual según Quinteros, Ramírez y Ramos (2013) es de 570 picogramos.

La interpretación para el término bajo el límite de detección del equipo (BLD), se refiere a la tendencia de una línea recta cercana al origen presentada en los espectros de cada muestra,

este comportamiento se obtiene cuando el valor de metal Cadmio está por debajo de 570 picogramos. Por lo cual para todas las muestras que presentaron este comportamiento se reportaron como datos BLD en la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.

El metal Plomo por presentar una energía de excitación muy alta, es leído en líneas  $L_{\beta}$  y no en líneas  $K_{\alpha}$  como es el caso de los metales Cadmio, Níquel y Zinc. Debido a que no se realizó una curva de sensibilidad específica para líneas  $L_{\beta}$ , no se reportaron datos de Plomo.

Se registraron las concentraciones de Níquel y Zinc; que fueron identificadas en base a su energía de excitación. Las concentraciones obtenidas con la técnica de TXRF se presentan como  $C_{QXAS} Ni$  y  $C_{QXAS} Zn$ , en unidades de partes por millón y de las cuales se parte para calcular la concentración total del metal, a través de factores de dilución (véase Tabla 4.1 y Tabla 4.2).

Tabla 4. 1. Concentraciones obtenidas por el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total para Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc para matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.

Matríz	Punto	Código de muestra	C <sub>QXAS</sub> Ni	C <sub>QXAS</sub> Zn	V <sub>muestra</sub> (mL) o W <sub>muestra</sub> (g)	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Cd (ppm)	Conc. Ni (ppm)	Conc. Pb (ppm)	Conc. Zn (ppm)
Agua superficial	RPAS01	H2ORIO01	1.9710	0.5850	50.0000	N/A*	BLD**	1.9710	NC***	0.5850
	RPAS02	H2ORIO02	0.5880	0.5380	50.0000	N/A*	BLD**	0.5880	NC***	0.5380
	RPAS03	H2ORIO03	1.2510	0.6040	50.0000	N/A*	BLD**	1.2510	NC***	0.6040
	RPAS04	H2ORIO04	2.0050	0.8240	50.0000	N/A*	BLD**	2.0050	NC***	0.8240
Sedimento	RPSE01	SEDRI001	0.8610	0.9210	0.5023	25.1150	BLD**	21.6240	NC***	23.1309
	RPSE02	SEDRI002	0.3840	0.5280	0.5022	25.1100	BLD**	9.6422	NC***	13.2581
	RPSE03	SEDRI003	0.4450	0.6860	0.5037	25.1850	BLD**	11.2073	NC***	17.2769
	RPSE04	SEDRI004	0.4420	0.6050	0.5028	25.1400	BLD**	11.1119	NC***	15.2097
Agua subterránea	POZO02	H2OPOZ01	0.3710	0.4980	50.0000	N/A*	BLD**	0.3710	NC***	0.4980
	POZO04	H2OPOZ02	0.5950	0.4720	50.0000	N/A*	BLD**	0.5950	NC***	0.4720
	POZO05	H2OPOZ03	0.3950	0.2280	50.0000	N/A*	BLD**	0.3950	NC***	0.2280
	POZO07	H2OPOZ04	0.7490	0.1990	50.0000	N/A*	BLD**	0.7490	NC***	0.1990
	POZO09	H2OPOZ05	0.3250	0.1780	50.0000	N/A*	BLD**	0.3250	NC***	0.1780
	POZO10	H2OPOZ06	0.3160	0.1680	50.0000	N/A*	BLD**	0.3160	NC***	0.1680
	POZO11	H2OPOZ07	0.4490	0.2130	50.0000	N/A*	BLD**	0.4490	NC***	0.2130
	POZO12	H2OPOZ08	0.4860	0.2220	50.0000	N/A*	BLD**	0.4860	NC***	0.2220
	POZO13	H2OPOZ09	0.4480	0.2030	50.0000	N/A*	BLD**	0.4480	NC***	0.2030
	POZO15	H2OPOZ10	0.7790	0.3270	50.0000	N/A*	BLD**	0.7790	NC***	0.3270
POZO16	H2OPOZ11	0.6890	0.5630	50.0000	N/A*	BLD**	0.6890	NC***	0.5630	

\*N/A (No Aplica) para muestras líquidas en las cuales no existe factor de dilución.

\*\*BLD Bajo Límite de Detección del equipo para el metal Cadmio el cual es de 570 picogramos.

\*\*\*NC: no se pudo calcular por TXRF.

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

C<sub>QXAS</sub> Ni: concentración bruta en partes por millón calculada por el equipo de TXRF para el metal Níquel.

C<sub>QXAS</sub> Zn: Concentración bruta en partes por millón calculada por el equipo de TXRF para el metal Zinc.

Conc Cd (ppm), Conc Pb (ppm), Conc Zn (ppm): concentración total de metales pesados en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 2. Concentraciones obtenidas por el análisis de fluorescencia de rayos X por reflexión total para Cadmio, Níquel, Plomo y Zinc para matrices de biomasa y suelo.

Matríz	Punto	Código de muestra	C <sub>QXAS</sub> Ni	C <sub>QXAS</sub> Zn	V <sub>muestra</sub> (mL) o W <sub>muestra</sub> (g)	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Cd (ppm)	Conc. Ni (ppm)	Conc. Pb (ppm)	Conc. Zn (ppm)
Biomasa	CULT10	BIAYOT01	-	0.5920	1.0043	50.2150	BLD*	0.0000	NC**	29.7273
	CULT11	BIAYOT02	0.6240	1.2220	1.0004	50.0200	BLD*	31.2125	NC**	61.1244
	CULT09	BIAYOT03	0.2380	0.2760	1.0012	50.0600	BLD*	11.9143	NC**	13.8166
	CULT04	BICAÑA01	0.3530	0.5710	1.0020	50.1000	BLD*	17.6853	NC**	28.6071
	CULT04	BICAÑA02	0.4310	0.8090	1.0016	50.0800	BLD*	21.5845	NC**	40.5147
	CULT07	BICAÑA03	0.1550	1.0580	1.0008	50.0400	BLD*	7.7562	NC**	52.9423
	CULT07	BICAÑA04	0.2540	0.8670	1.0006	50.0300	BLD*	12.7076	NC**	43.3760
	CULT10	BICAÑA05	0.1430	0.2940	1.0011	50.0550	BLD*	7.1579	NC**	14.7162
Suelo	SUEL06	SUELOA01	0.5460	0.4570	0.5007	25.0350	BLD*	13.6691	NC**	11.4410
	SUEL06	SUELOA02	0.4140	0.5190	0.5012	25.0600	BLD*	10.3748	NC**	13.0061
	SUEL06	SUELOA03	0.4210	0.7690	0.5011	25.0550	BLD*	10.5482	NC**	19.2673
	SUEL09	SUELOA04	0.4210	0.3610	0.5046	25.2300	BLD*	10.6218	NC**	9.1080
	SUEL09	SUELOA05	0.5570	0.6410	0.5026	25.1300	BLD*	13.9974	NC**	16.1083
	SUEL11	SUELOA06	0.6570	0.6810	0.5074	25.3700	BLD*	16.6681	NC**	17.2770
	SUEL12	SUELOA07	0.4360	0.7790	0.5037	25.1850	BLD*	10.9807	NC**	19.6191
	SUEL13	SUELOA08	0.6300	0.7250	0.5015	25.0750	BLD*	15.7973	NC**	18.1794
	SUEL04	SUELOA09	0.6190	0.8160	0.5084	25.4200	BLD*	15.7350	NC**	20.7427
	SUEL05	SUELOA10	0.6990	0.6570	0.5010	25.0500	BLD*	17.5100	NC**	16.4579

\*BLD Bajo Límite de Detección del equipo para el metal Cadmio el cual es de 570 picogramos.

\*\*NC: no se pudo calcular por TXRF.

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

C<sub>QXAS</sub> Ni: concentración bruta en partes por millón calculada por el equipo de TXRF para el metal Níquel.

C<sub>QXAS</sub> Zn: concentración bruta en partes por millón calculada por el equipo de TXRF para el metal Zinc.

Conc Cd (ppm), Conc Pb (ppm), Conc Zn (ppm): concentración total de metales pesados en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. RESULTADOS POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO

En las tablas 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se detallan los resultados obtenidos por espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para las matrices de agua superficial, agua subterránea, sedimento y biomasa de cultivos para los metales Ni y Pb.

No se cuantificaron las concentraciones para los metales Cd y Zn porque las lámparas de cátodo hueco para el análisis de dichos metales se encontraban en mal estado.

Los valores de concentración real para los metales Ni y Pb para muestras sólidas se calcularon utilizando factores de dilución, con la ecuación 4.1.

El equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica con horno de grafito permite la utilización de un blanco, por lo que el valor bruto obtenido es la concentración de la muestra corregida.

La concentración total de la muestra original se calculó utilizando la ecuación 4.4

$$C = (a - b)_{A.A} \times FD_T \quad \text{Ec. 4. 4}$$

Dónde:

$(a - b)_{A.A}$  = concentración bruta en muestra analizada por medio de espectroscopia de A.A con horno de grafito en unidades de partes por millón.

$FD_T$  = factor de dilución total.

Se presenta a continuación un ejemplo de cálculo para muestra sólida, correspondiente a SUELO01, para el metal Níquel.

$$FD_T = \frac{50 \text{ mL}}{0.5007 \text{ g}} = 99.8601 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

$$C = 0.0852 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 99.8601 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

$$C = 8.5080 \frac{mg}{kg} = 8.5080 \text{ ppm}$$

De las Tablas 4.3 a 4.6 se presentan los resultados obtenidos por la técnica espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito, para los metales Níquel y Plomo en las matrices de agua superficial, sedimento, agua subterránea, biomasa y suelo.

Las muestras de agua presentaron valores bajo el límite de detección del método (BLDM) que en absorbancia son de 0.029 para Níquel en matrices de agua superficial y subterránea, 0.042 para Plomo en matrices de agua superficial y subterránea, 0.072 para Níquel en matrices de sedimento, biomasa y suelo y 0.027 para Plomo en matrices de sedimento, biomasa y suelo. Véase sección 3.4.1.

En la presente investigación, todas las muestras que presentaron un valor de absorbancia menor a la del blanco, se reportaron como BLDM, que se aproximó a cero de concentración en ppm del metal analizado (0.0000 ppm Pb o 0.0000 ppm Ni).

Tabla 4. 3. Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Níquel en matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.

Matríz	Punto	Código de muestra	Absorbancia Ni	Concentración Ni (ppm)	$V_{\text{muestra}} \text{ (mL)}$ o $W_{\text{muestra}} \text{ (g)}$	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Ni (ppm)
Agua superficial	RPAS01	H2ORIO01	0.1250	0.0196	50.0000	N/A**	0.0196
	RPAS02	H2ORIO02	0.0570	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	RPAS03	H2ORIO03	0.0350	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	RPAS04	H2ORIO04	0.0170	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
Sedimento	RPSE01	SEDRIO01	0.6020	0.2037	0.5023	25.1150	5.1159
	RPSE02	SEDRIO02	0.4950	0.1660	0.5022	25.1100	4.1683
	RPSE03	SEDRIO03	0.5370	0.1807	0.5037	25.1850	4.5509
	RPSE04	SEDRIO04	0.4880	0.1634	0.5028	25.1400	4.1078
Agua subterránea	POZO02	H2OPOZ01	0.0590	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO04	H2OPOZ02	0.0390	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO05	H2OPOZ03	0.0160	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO07	H2OPOZ04	0.0090	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO09	H2OPOZ05	0.0100	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO10	H2OPOZ06	0.0120	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO11	H2OPOZ07	0.0080	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO12	H2OPOZ08	0.0150	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO13	H2OPOZ09	0.0110	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO15	H2OPOZ10	0.0610	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
POZO16	H2OPOZ11	0.0140	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*	

\*BLDM (Bajo Límite de Detección del Método): valores bajo el límite de detección, que se aproximó a 0.0000 ppm de Níquel.

\*\*N/A (No Aplica): para muestras líquidas en las cuales no existe factor de dilución.

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

Conc Ni (ppm) concentración total del metal Níquel en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 4. Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Níquel en matrices de biomasa y suelo.

Matríz	Punto	Código de muestra	Absorbancia Ni	Concentración Ni (ppm)	$\frac{V_{\text{muestra}} \text{ (mL)}}{W_{\text{muestra}} \text{ (g)}}$	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Ni (ppm)
Biomasa	CULT10	BIAYOT01	0.0910	0.0243	1.0043	50.2150	1.2202
	CULT11	BIAYOT02	0.1010	0.0278	1.0004	50.0200	1.3905
	CULT09	BIAYOT03	0.0810	0.0206	1.0012	50.0600	1.0312
	CULT04	BICAÑA01	0.0570	0.0122	1.0020	50.1000	0.6112
	CULT04	BICAÑA02	0.1220	0.0351	1.0016	50.0800	1.7578
	CULT07	BICAÑA03	0.0810	0.0206	1.0008	50.0400	1.0308
	CULT07	BICAÑA04	0.0510	0.0101	1.0006	50.0300	0.5053
	CULT10	BICAÑA05	0.0480	0.0091	1.0011	50.0550	0.4555
Suelo	SUELO6	SUELOA01	0.2650	0.0852	0.5007	25.0350	2.1330
	SUELO6	SUELOA02	0.3380	0.1110	0.5012	25.0600	2.7817
	SUELO6	SUELOA03	0.4960	0.1662	0.5011	25.0550	4.1641
	SUELO9	SUELOA04	0.4640	0.1550	0.5046	25.2300	3.9107
	SUELO9	SUELOA05	0.4220	0.1405	0.5026	25.1300	3.5308
	SUEL11	SUELOA06	0.5560	0.1873	0.5074	25.3700	4.7518
	SUEL12	SUELOA07	0.4470	0.1490	0.5037	25.1850	3.7526
	SUEL13	SUELOA08	0.3910	0.1294	0.5015	25.0750	3.2447
	SUEL04	SUELOA09	0.5310	0.1787	0.5084	25.4200	4.5425
	SUEL05	SUELOA10	0.4570	0.1526	0.5010	25.0500	3.8226

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

Conc Ni (ppm) Concentración total del metal Níquel en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 5. Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Plomo en matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.

Matríz	Punto	Código de muestra	Absorbancia Pb	Concentración Pb (ppm)	V <sub>muestra</sub> (mL) o W <sub>muestra</sub> (gr)	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Pb (ppm)
Agua superficial	RPAS01	H2ORIO01	0.0150	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	RPAS02	H2ORIO02	0.0160	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	RPAS03	H2ORIO03	0.0200	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	RPAS04	H2ORIO04	0.0060	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
Sedimento	RPSE01	SEDRIO01	0.2640	0.0401	0.5023	25.1150	1.0071
	RPSE02	SEDRIO02	0.6580	0.1810	0.5022	25.1100	4.5449
	RPSE03	SEDRIO03	0.3830	0.0824	0.5037	25.1850	2.0752
	RPSE04	SEDRIO04	1.7170	0.5599	0.5028	25.1400	14.0759
Agua subterránea	POZO02	H2OPOZ01	0.0220	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO04	H2OPOZ02	0.0260	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO05	H2OPOZ03	0.0200	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO07	H2OPOZ04	0.0400	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO09	H2OPOZ05	0.0140	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO10	H2OPOZ06	0.0240	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO11	H2OPOZ07	0.0370	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO12	H2OPOZ08	0.0460	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO13	H2OPOZ09	0.0880	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
	POZO15	H2OPOZ10	0.0250	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*
POZO16	H2OPOZ11	0.0460	BLDM*	50.0000	N/A**	BLDM*	

\*BLDM (Bajo Límite de Detección del Método): valores bajo el límite de detección, que se aproximó a 0.0000 ppm de Plomo.

\*\*N/A (No Aplica): para muestras líquidas en las cuales no existe factor de dilución.

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

Conc Pb (ppm) concentración total del metal Plomo en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 6. Concentraciones obtenidas por el análisis de espectroscopia de absorción atómica con horno de grafito para Plomo en matrices de biomasa y suelo.

Matríz	Punto	Código de muestra	Absorbancia Pb	Concentración Pb (ppm)	$\frac{V_{\text{muestra}} \text{ (mL)}}{W_{\text{muestra}} \text{ (g)}}$	Factor de dilución total (FD <sub>T</sub> )	Conc. Pb (ppm)
Biomasa	CULT10	BIAYOT01	0.0950	BLDM*	1.0043	50.2150	BLDM*
	CULT11	BIAYOT02	1.0080	0.3060	1.0004	50.0200	15.3061
	CULT09	BIAYOT03	0.0540	BLDM*	1.0012	50.0600	BLDM*
	CULT04	BICAÑA01	0.0330	BLDM*	1.0020	50.1000	BLDM*
	CULT04	BICAÑA02	0.0320	BLDM*	1.0016	50.0800	BLDM*
	CULT07	BICAÑA03	0.0220	BLDM*	1.0008	50.0400	BLDM*
	CULT07	BICAÑA04	0.0430	BLDM*	1.0006	50.0300	BLDM*
	CULT10	BICAÑA05	0.1170	BLDM*	1.0011	50.0550	BLDM*
Suelo	SUEL06	SUELOA01	1.0280	0.3132	0.5007	25.0350	7.8410
	SUEL06	SUELOA02	0.5630	0.1471	0.5012	25.0600	3.6863
	SUEL06	SUELOA03	0.4080	0.0915	0.5011	25.0550	2.2925
	SUEL09	SUELOA04	0.5310	0.1356	0.5046	25.2300	3.4219
	SUEL09	SUELOA05	0.3620	0.0750	0.5026	25.1300	1.8848
	SUEL11	SUELOA06	0.3250	0.0617	0.5074	25.3700	1.5653
	SUEL12	SUELOA07	0.4270	0.0982	0.5037	25.1850	2.4732
	SUEL13	SUELOA08	0.5310	0.1354	0.5015	25.0750	3.3951
	SUEL04	SUELOA09	0.7300	0.2066	0.5084	25.4200	5.2518
	SUEL05	SUELOA10	0.8150	0.2372	0.5010	25.0500	5.9419

\*BLDM (Bajo Límite de Detección del Método): valores bajo el límite de detección, que se aproximó a 0.0000 ppm de Plomo.

V<sub>muestra</sub>, ml: volumen de muestra total tomada para el análisis en mililitros.

W<sub>muestra</sub>, g: masa de muestra tomada para el análisis en gramos.

Conc Pb (ppm) concentración total del metal Plomo en matrices originales investigadas.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN APARENTE

Propuesta al cálculo del coeficiente de absorción aparente de metales. (Quinteros Escalante, H. E. D., Ramírez Morataya, B. J. G. y Ramos Orantes, J. A. 2013)

$$\text{Coeficiente de Absorción} = \frac{C_{\text{Metal en biomasa}}}{C_{\text{Total de metal en el suelo}}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Esta ecuación considera como única aportación de absorción las concentraciones del suelo.

De esta manera se puede relacionar la concentración de los metales en las diferentes muestras de biomasa, con la concentración del suelo. Esto representa la posible cantidad que una biomasa absorbe del medio en el que se encuentra.

En la Tabla 4.7 se presentan los valores de concentración para los metales Ni, Pb y Zn para las matrices de biomasa y suelo. Valores para Cd no son presentados ya que no se cuantificó.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo del coeficiente de absorción aparente de Níquel en la muestra BIAYOT03.

$$\text{Coef. } A_{\text{BIAYOT02}} = \frac{1.3905 \text{ ppm}}{3.7526 \text{ ppm}}$$

$$\text{Coef. } A_{\text{BIAYOT02}} = 0.3705$$

Para la muestra de cultivo de ayote se tiene un coeficiente de absorción aparente de 0.3705

En la Tabla 4.8 se presentan los diferentes coeficientes de absorción aparente calculados para los cultivos de ayote y caña de azúcar.

Tabla 4. 7. Consolidado de los valores de concentración para los metales Ni, Pb y Zn para matrices de biomasa y suelos.

Matríz	Punto	Código de muestra	Concentración de Zn (ppm)*	Concentración de Ni(ppm)**	Concentración de Pb(ppm)**
Biomasa	CULT10	BIAYOT01	29.7273	1.2202	BLDM***
	CULT11	BIAYOT02	61.1244	1.3905	15.3061
	CULT09	BIAYOT03	13.8166	1.0312	BLDM***
	CULT04	BICAÑA01	28.6071	0.6112	BLDM***
	CULT04	BICAÑA02	40.5147	1.7578	BLDM***
	CULT07	BICAÑA03	52.9423	1.0308	BLDM***
	CULT07	BICAÑA04	43.3760	0.5053	BLDM***
	CULT10	BICAÑA05	14.7162	0.4555	BLDM***
Suelo	SUEL06	SUELOA01	11.4410	2.1330	7.8401
	SUEL06	SUELOA02	13.0061	2.7817	3.6863
	SUEL06	SUELOA03	19.2673	4.1641	2.2925
	SUEL09	SUELOA04	9.1080	3.9107	3.4212
	SUEL09	SUELOA05	16.1083	3.5308	1.8848
	SUEL11	SUELOA06	17.2770	4.7518	1.5653
	SUEL12	SUELOA07	19.6191	3.7526	2.4732
	SUEL13	SUELOA08	18.1794	3.2447	3.3952
	SUEL04	SUELOA09	20.7427	4.5425	5.2518
	SUEL05	SUELOA10	16.4579	3.8226	5.9419

\* Concentraciones obtenidas por técnica de TXRF.

\*\* Concentraciones obtenidas por técnica de AA con horno de grafito.

\*\*\*BLDM Bajo el Límite de Detección del Método, que se aproximó a 0.0000 ppm de Plomo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. 8. Coeficientes de absorción aparente de metales para Ni, Pb y Zn en matriz biomasa.

Código de muestra	Coefficiente de absorción de Zn	Coefficiente de absorción de Ni	Coefficiente de absorción de Pb
BIAYOT01	1.7206	0.2568	NC*
BIAYOT02	3.1156	0.3705	6.1889
BIAYOT03	0.7600	0.3178	NC*
BICAÑA01	2.1995	0.2197	NC*
BICAÑA02	2.1028	0.4221	NC*
BICAÑA03	5.8127	0.2636	NC*
BICAÑA04	2.6928	0.1431	NC*
BICAÑA05	0.8518	0.0959	NC*

\*NC (No Calculable), debido a que los valores de concentración de biomasa están bajo el límite de detección del método, que se aproximó a 0.0000 ppm de Plomo.

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

##### **4.4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA TÉCNICA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X POR REFLEXIÓN TOTAL**

La técnica de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión total permitió la identificación semi-cuantitativa de los metales Níquel y Zinc en las cuatro matrices estudiadas, no se contemplaron blancos de digestión en las muestras ya que el fin de la técnica en esta investigación es la identificación semi-cuantitativa. Sin embargo, el blanco de corrección en el porta muestra si fue considerado.

Es importante mencionar que la cubierta del detector del equipo de fluorescencia de rayos X por reflexión total está fabricada a base de Níquel, lo que generó aportaciones del metal en las lecturas y esta no pudo ser eliminada, por esto los valores obtenidos para Níquel por medio de esta técnica no son confiables.

En el caso del Cadmio los valores leídos por el equipo de TXRF fueron bajo el límite de detección del equipo (BLD) que es de 570 picogramos, por lo que se reportó su concentración para Cadmio como BLD.

El término bajo el límite de detección del equipo (BLD), se refiere a la tendencia de una línea recta cercana al origen presentada en los espectros de cada muestra, este comportamiento se obtiene cuando el valor de metal Níquel está por debajo de 570 picogramos.

El metal Plomo por presentar una energía de excitación muy alta, es leído en líneas  $L_{\beta}$  y no en líneas  $K_{\alpha}$  como es el caso de los metales Cadmio, Níquel y Zinc. Debido a que no se realizó una curva de sensibilidad específica para líneas  $L_{\beta}$ , no se reportaron datos de Plomo.

##### **4.4.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LA TÉCNICA ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO**

Los análisis de Absorción Atómica con horno de grafito se realizaron para los metales Níquel y Plomo en todas las matrices de interés.

Las muestras de agua presentaron valores bajo el límite de detección del método que en todos los casos se reportan en unidades de absorbancia y siendo estas de 0.029 para Níquel en matrices de agua superficial y subterránea, 0.072 en matrices de sedimento, biomasa y suelo 0.042. Para Plomo 0.042 en matrices de agua superficial y subterránea y 0.027 en matrices de sedimento, biomasa y suelo (Véase sección 3.4.1). Para todas las muestras que presentaron un valor de absorbancia menor a la del blanco, se reportaron como bajo el límite de detección del método (BLDM), que se aproximó a 0.0000 ppm del metal analizado.

La cuantificación para los metales Níquel y Cadmio no fue posible debido a daños en las lámparas de elementos Níquel y Cadmio.

#### **4.4.3. COMPARACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS ENCONTRADOS EN LAS DIFERENTES MATRICES ANALIZADAS CONTRA NORMAS DE REFERENCIA**

- I. Evaluación de los límites de concentración de Níquel encontrados en las diferentes matrices agua, sedimento, suelo y biomasa analizadas.

Todas las muestras de agua superficial y agua subterránea analizadas reportaron concentraciones de Plomo bajo el límite de detección del método (BLDM), el cual puede aproximarse a 0.0000 ppm concentración de Níquel, por lo que se determinó que no sobrepasan el límite establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08. (0.02 ppm Ni) ni el límite permitido por la Normativa EPA de Plomo en agua (5 ppm Ni).

Todas las muestras analizadas de la matriz suelo reportaron concentraciones de Níquel entre 2.13 ppm Ni (muestra SUELOA01) y 4.75 ppm Ni (muestra SUELOA06) que no sobrepasaron el límite permitido por la norma Real Decreto de España (30 ppm Ni) ni el límite permitido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (45 ppm Ni).

En cuanto a las muestras analizadas de la matriz sedimento, éstas reportaron concentraciones de Níquel entre 4.11 ppm Ni (muestra SEDRIO04) y 5.12 ppm Ni (muestra SEDRIO04), lo

que demuestra que no sobrepasaron el límite permitido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines.

Todas las muestras de la matriz biomasa analizadas reportaron valores de concentración de Níquel entre 0.45 ppm Ni (muestra BICAÑA05) y 1.76 ppm Ni (muestra BICAÑA02), para esta matriz no se encontró norma nacional o internacional de referencia o base de comparación.

## II. Evaluación de los límites de concentración de Plomo encontrados en las diferentes matrices agua, sedimento, suelo y biomasa analizadas.

Todas las muestras de agua superficial y agua subterránea analizadas reportaron concentraciones de Plomo bajo el límite de detección del método (BLDM), el cual puede aproximarse a 0.0000 ppm Pb, por lo que se observó que no sobrepasan el límite establecido por la Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08. (0.01 ppm Pb) ni sobrepasan el límite permitido por la Normativa EPA de Plomo en agua (0.015 ppm Pb).

Todas las muestras analizadas de la matriz suelo reportaron concentraciones de Níquel entre 1.57 ppm Pb (muestra SUELOA06) y 7.84 ppm Pb (muestra SUELOA01), por lo que se observó que no sobrepasan el límite permitido por El Convenio de Basilea (25 ppm Pb) ni sobrepasan el límite permitido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (75 ppm Pb).

Todas las muestras de la matriz sedimento analizadas reportaron valores de concentración de Plomo entre 1.001 ppm Pb (muestra SEDRIO01) y 14.08 ppm Pb (muestra SEDRIO04), por lo que se observó que no sobrepasan el rango establecido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (35 a 91.30 ppm Pb).

Todas las muestras de la matriz biomasa analizadas reportaron concentraciones de Plomo bajo el límite de detección del método (BLDM), el cual puede aproximarse a 0.0000 ppm de Pb. Se exceptúa de este grupo una única muestra BIAYOT02 que corresponde a una de las muestras de ayote, que reportó un valor de 15.31 ppm Pb. Por lo que se observa que las

muestras de la matriz biomasa analizadas no sobrepasan el rango establecido por El Codex Alimenticio (0.1 a 1 ppm Pb), a excepción de la muestra BIAYOT02.

III. Evaluación de los límites de concentración de Zinc encontrados en las diferentes matrices agua, sedimento, suelo y biomasa analizadas.

Las muestras de la matriz agua superficial analizadas reportaron concentraciones de Zinc entre 0.538 ppm Zn (muestra H2ORIO02) y 0.824 ppm Zn (muestra H2ORIO04), por lo que se observó que no sobrepasan el límite permitido por la Norma salvadoreña obligatoria NSO 13.07.01:08 (5 ppm Zn)

Todas las muestras de la matriz sedimento analizadas reportaron concentraciones de Zinc entre 13.26 ppm Zn (muestra SEDRIO02) y 23.13 ppm Zn (muestra SEDRIO01), lo que mostró que no sobrepasan el límite permitido para esta matriz según la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (123 ppm Zn).

En cuanto a las muestras analizadas de la matriz agua subterránea estas reportaron concentraciones entre 0.17 ppm Zn (muestra H2OPOZ06) y 0.56 ppm Zn (muestra H2OPOZ16), lo que mostró que ninguna sobrepasa el límite máximo permitido por la norma salvadoreña obligatoria NSO 13.07.01:08 (5 ppm).

Todas las muestras analizadas de la matriz suelo reportaron concentraciones de Zinc entre 9.11 ppm Zn (muestra SUELOA04) y 20.74 ppm Zn (muestra SUELOA09), por lo que se observó que no sobrepasan el límite permitido por El Real Decreto de España (150 ppm Zn) ni sobrepasan el límite permitido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (200 ppm Zn).

Todas las muestras de la matriz sedimento analizadas reportaron valores de concentración de Zinc entre 13.26 ppm Zn (muestra SEDRIO02) y 23.14 ppm Zn (muestra SEDRIO01), por lo que se observó que no sobrepasan el rango permitido por la norma Canadian Environmental Quality Guidelines (123 a 315 ppm Zn).

Todas las muestras de la matriz biomasa analizadas reportaron valores de concentración de Zinc entre 13.81 ppm Zn (muestra BIAYOT03) y 43.38 ppm Zn (muestra BICAÑA04), para esta matriz no se encontró norma nacional o internacional de referencia o base de comparación.

#### **4.4.4. ANÁLISIS DE LOS COEFICIENTES DE ABSORCIÓN APARENTE DE METALES NÍQUEL, PLOMO Y ZINC EN MATRÍZ BIOMASA**

La propuesta de cálculo del coeficiente de absorción aparente da como resultado en su mayoría valores menores a 1, en los metales Níquel y Plomo, caso contrario al metal Zinc en el cual en su mayoría sobrepasan el valor de 1, indicando de esta forma que el Zn probablemente es encontrado en estos cultivos no por absorción del suelo sino también por otros factores externos que podrían estar relacionados con el uso de pesticidas y fertilizantes.

El coeficiente de absorción aparente de Zinc más alto fue de 5.8127 en la muestra de caña BICAÑA03, de Níquel el coeficiente de absorción aparente más alto fue de 0.4221 en la muestra BICAÑA02 y para Plomo el coeficiente de absorción aparente más alto obtenido fue de 6.1889 en la muestra BIAYOT02

#### **4.4.5. DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LOS METALES NÍQUEL, PLOMO Y ZINC ENCONTRADOS PARA LAS DIFERENTES MATRICES EN LA ZONA DE INFLUENCIA DEL RELLENO SANITARIO DE SONSONATE**

Para la interpretación de las concentraciones de Níquel, Plomo y Zinc encontrados en las matrices agua superficial, agua subterránea, sedimento, suelo y biomasa en función de la distribución de los metales en la zona de influencia del relleno sanitario, fue necesario una modelación de interpolación Kriging ArcGIS (programa de interpolación de mapas de contorno versión 10.4) utilizando como base los datos presentados en el Anexo 21 y 22. Basándose en dichos datos, se generan las curvas de isocontorno de concentración para representar como se da la distribución de concentraciones de cada metal en cada matriz estudiada en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate. A los mapas resultantes

se les denominó mapas temáticos realizados con el software ArcGIS. La información requerida para la generación de los mapas temáticos es la siguiente:

- a. Mapas cartográficos de la zona de estudio.
- b. Coordenadas geográficas de cada punto (véase Anexo 21 y Anexo 22).
- c. Datos de concentración de cada uno de los metales, para Níquel y Plomo son utilizados los valores obtenidos por la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica con horno de grafito y para Zinc se utilizaron los valores resultantes de la técnica de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total (véase Anexo 21 y Anexo 22).

En las páginas siguientes se describirá la distribución de las concentraciones de los metales pesados con respecto a cada las matrices estudiadas.

Los rectángulos coloreados que se observan en las imágenes corresponden a la interpolación realizada por el programa ArcGIS con fines ilustrativos, las que se encuentran alrededor de los puntos de muestreo con color rojo, representan los valores de concentración, entre mayor es el tamaño del círculo mayor es el valor de concentración en el punto. En cambio, las coloraciones entorno a los puntos de muestreo ilustran las máximas, medias y bajas concentraciones encontradas, siendo el color verde una baja concentración, amarillo y naranja una concentración media y rojo una concentración máxima.

- I. Distribución de las concentraciones de Níquel encontradas en las matrices analizadas en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador

En lo que respecta a la distribución de la concentración del metal Ni en las diferentes matrices analizadas se observó:

- a. Para matriz de sedimento de río, se identificó que la mayor concentración de Ni se ubicó a aproximadamente 1000 metros en dirección Este con respecto al relleno sanitario, presentando una distribución de la concentración de Ni descendente en

dirección de aguas abajo del río Pululuya, observándose así, su valor mínimo a 700 metros (en dirección Sur) con respecto al relleno sanitario (véase Figura 4.1).

- b. Para matriz de suelo, al observarse la Figura 4.2, se identificó que las mayores concentraciones de Ni se ubicaron en zonas muy cercanas al relleno sanitario, a 500 metros del mismo (en dirección Sur), luego presenta una tendencia de una leve disminución seguida de un valor máximo, la cual se observa repetidamente cada 500 metros en dirección Sur con respecto al relleno sanitario, dando un último aumento a 1500 metros.
- c. Para matriz de biomasa, se identificó mediante la Figura 4.3 que el valor mínimo de concentración de Ni se encontró a 500 metros del relleno sanitario (en dirección Sur-Este), luego a medida se desplaza en dirección Sur (con respecto al relleno sanitario) presenta un incremento en la distribución de concentraciones hasta llegar a 1000 metros en dirección Sur donde se presenta el máximo de concentración de Ni.

En resumen, al analizar en conjunto el comportamiento de la posible distribución del Níquel para las matrices estudiadas (sedimento de río, suelo y biomasa) se observó el siguiente escenario: “Dado que no se observa una tendencia en conjunto para las tres matrices, se estableció que la probable distribución de mayores concentraciones de Níquel en la matriz de sedimento de río se ubicó en las aguas arriba del río Pululuya. En la matriz de suelo se identificó que la distribución de mayores concentraciones se da en las cercanías del relleno sanitario, la cual, va disminuyendo a medida va se incrementa la distancia con respecto del relleno sanitario, caso contrario para la matriz de biomasa que sus concentraciones disminuyendo a medida se acerca al relleno sanitario.”

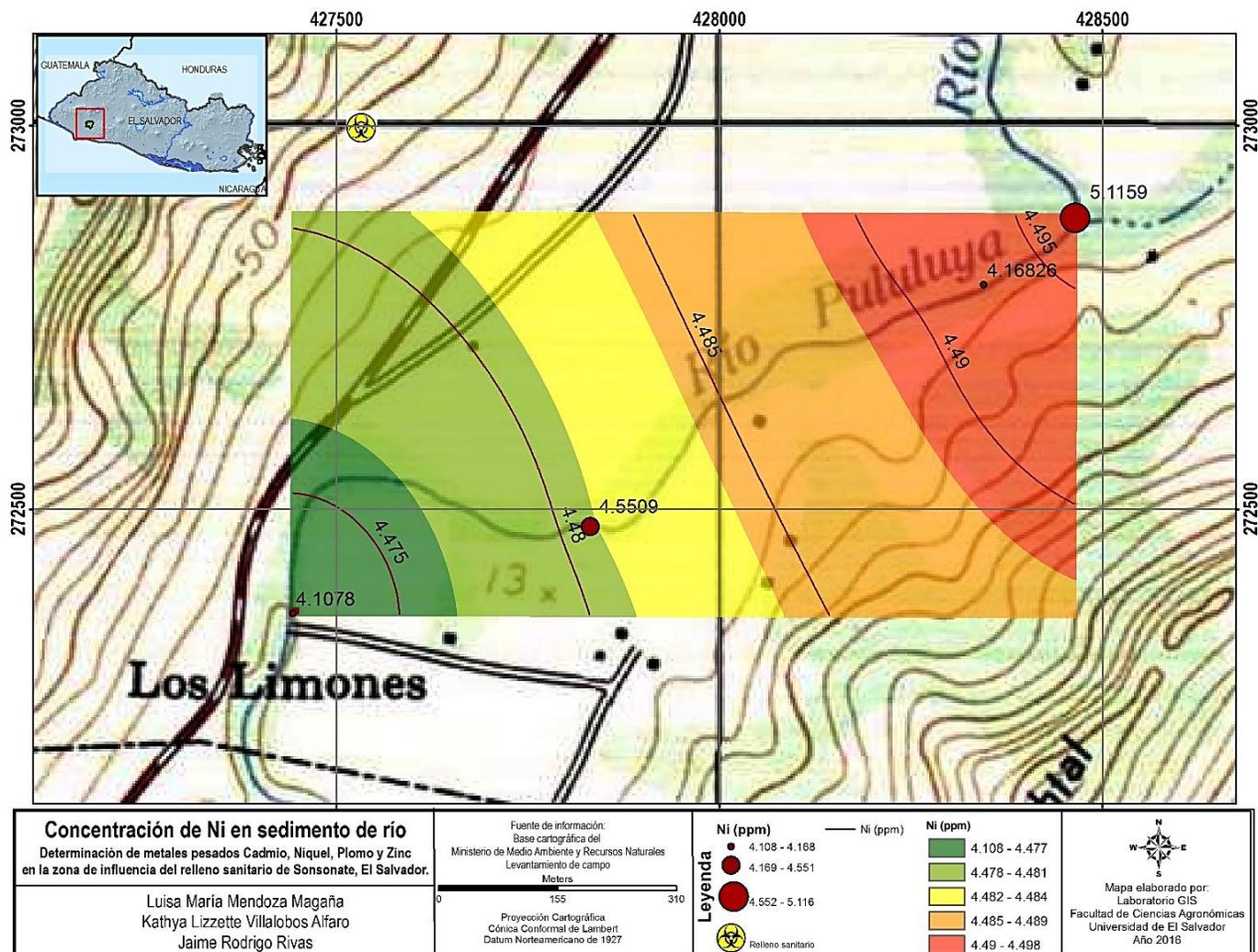


Figura 4. 1. Mapa de distribución de la concentración de Níquel obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

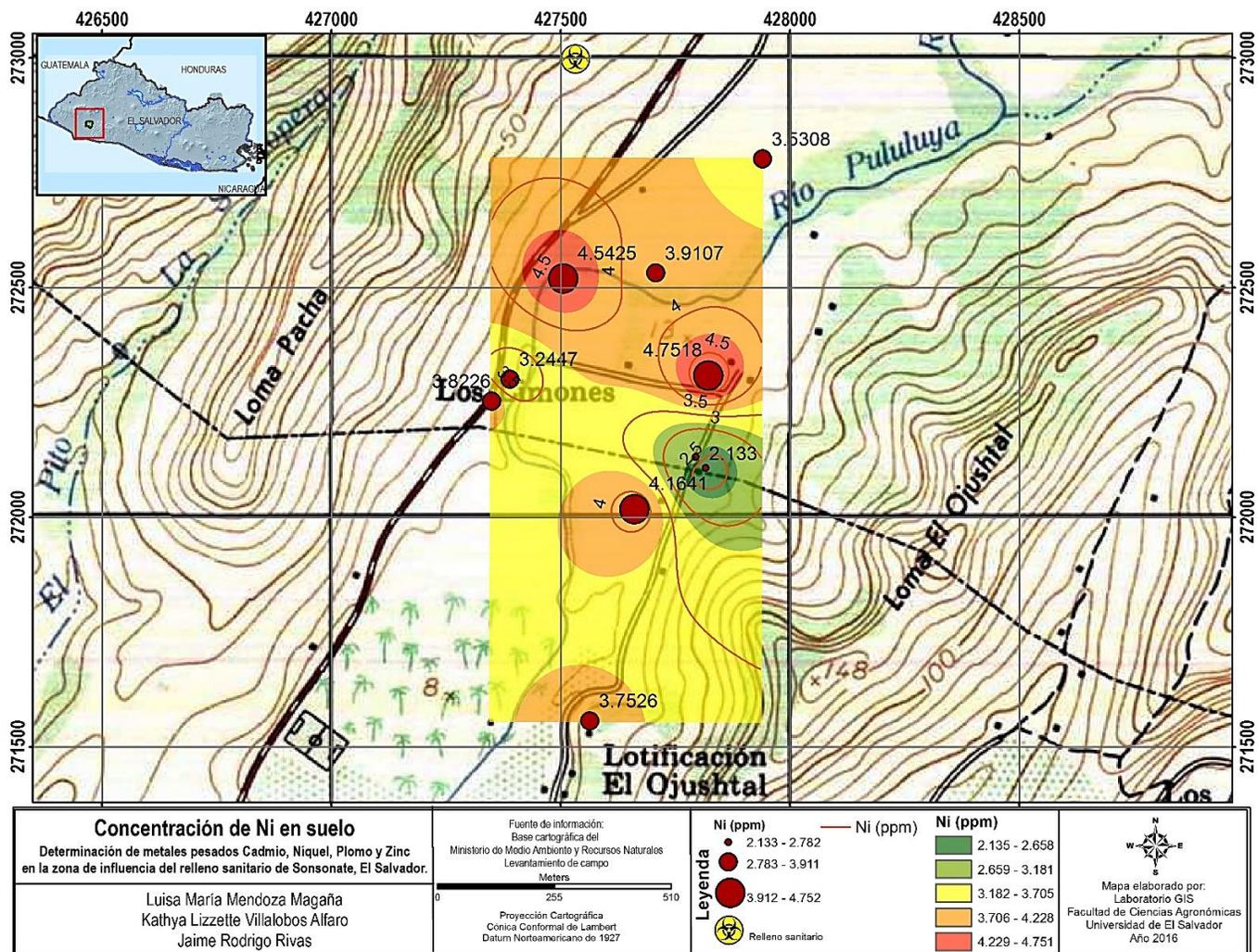


Figura 4. 2. Mapa de distribución de la concentración de Níquel obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

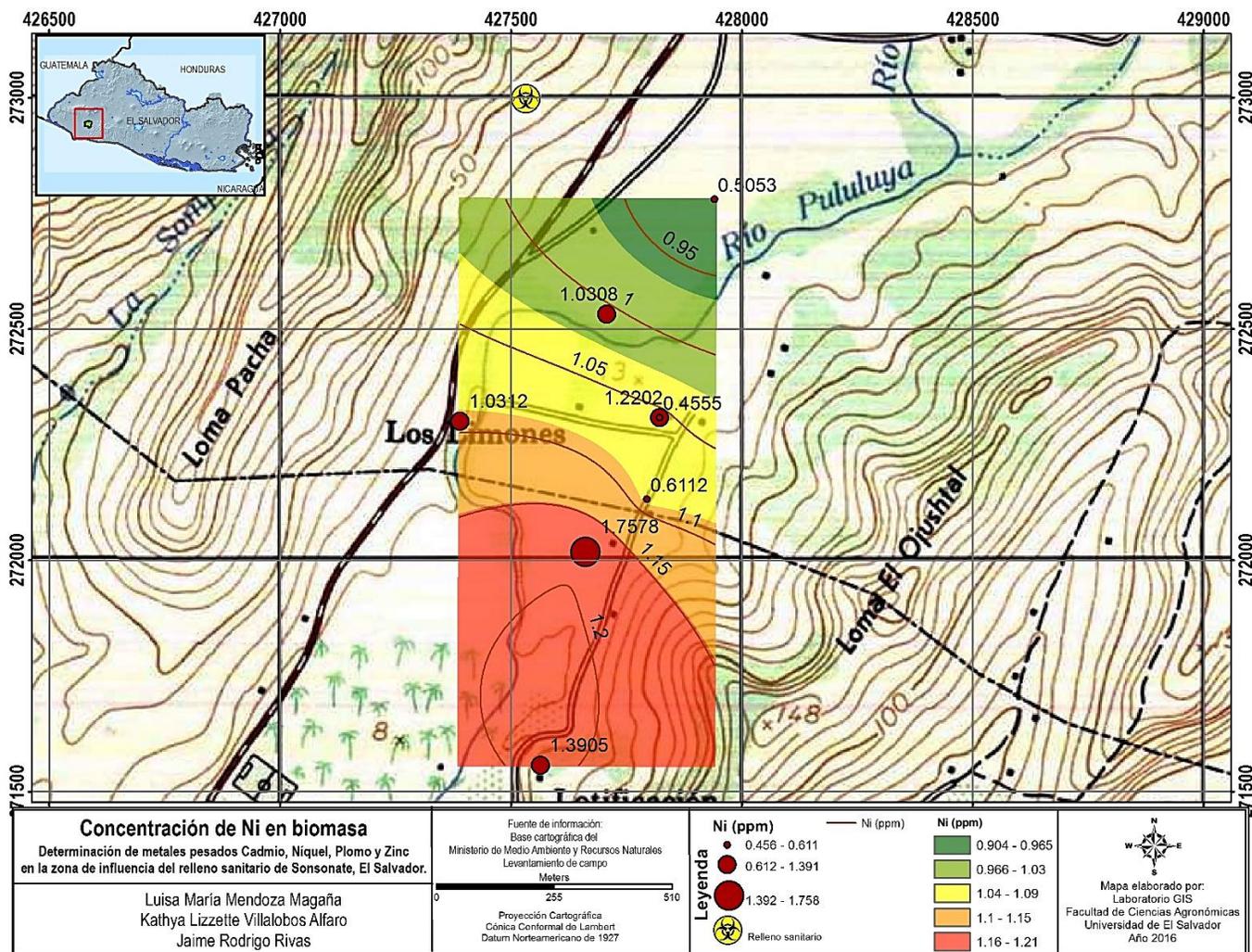


Figura 4. 3. Mapa de distribución de la concentración de Níquel obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

II. Distribución de las concentraciones de Plomo encontradas en las matrices analizadas en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.

En lo que respecta a la distribución de la concentración del metal Pb en las diferentes matrices analizadas se observó:

- a. Para matriz de sedimento de río, la tendencia de distribución de menor a mayores concentraciones de Pb se ubicó iniciando en aguas arriba hacia aguas abajo del río Pululuya, observando valores de concentración considerables a 600 metros con respecto al relleno sanitario (véase Figura 4.4).
- b. Para matriz de suelo, al observar la Figura 4.5, se determinó que las mayores concentraciones de Pb se ubicaron en zonas muy cercanas al relleno sanitario, a 500 y 700 metros del mismo (en dirección Sur), luego presentó una tendencia de disminución hasta llegar a los 1000 metros en dirección Sur Este con respecto al relleno sanitario donde se generó un nuevo incremento en las concentraciones.
- c. Para matriz de biomasa, se identificó mediante la Figura 4.6 que la concentración más alta de Pb se encontró a aproximadamente 1500 metros del relleno sanitario (en dirección Sur, observándose así una distribución de concentraciones creciente iniciando a 500 metros (dirección Sur-Este) e incrementando hasta llegar a los 1500 metros (en dirección Sur con respecto al relleno sanitario).

En resumen, al analizar en conjunto el comportamiento de la posible distribución del Plomo para las matrices estudiadas (sedimento de río, suelo y biomasa) se observó el siguiente escenario: “La probable distribución de mayores concentraciones de Plomo se ubicó en las aguas abajo del río Pululuya aproximadamente a 600 metros para la matriz de sedimento de río y a 1500 metros para matriz de biomasa en dirección Sur con respecto al relleno sanitario, estas disminuyen a medida se van acercando al relleno sanitario, a excepción de la matriz de suelo, la cual, presentó sus mayores concentraciones a 500 metros Sur y disminuyendo a medida aumenta la distancia con respecto al relleno sanitario.”

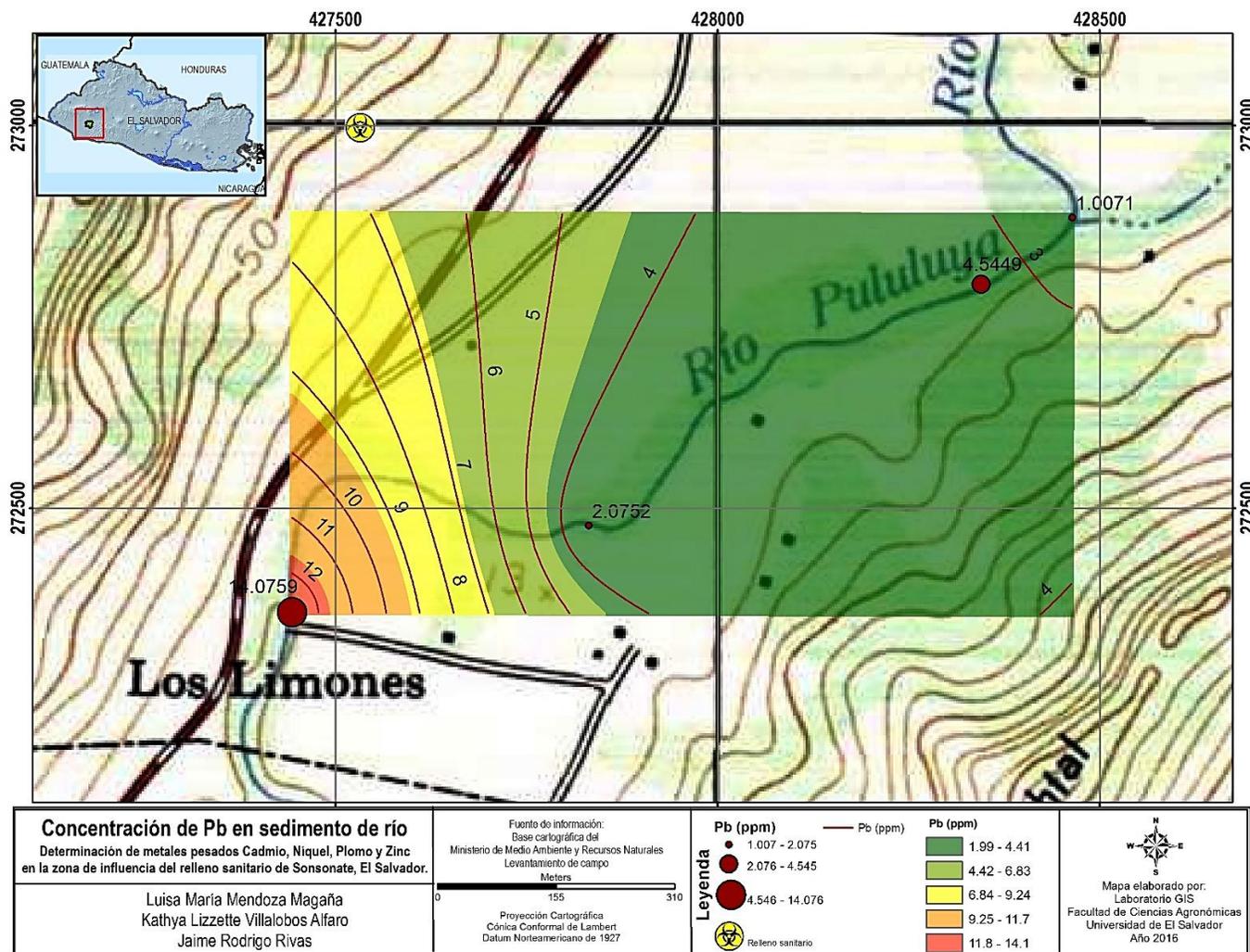


Figura 4. 4. Mapa de distribución de la concentración de Plomo obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

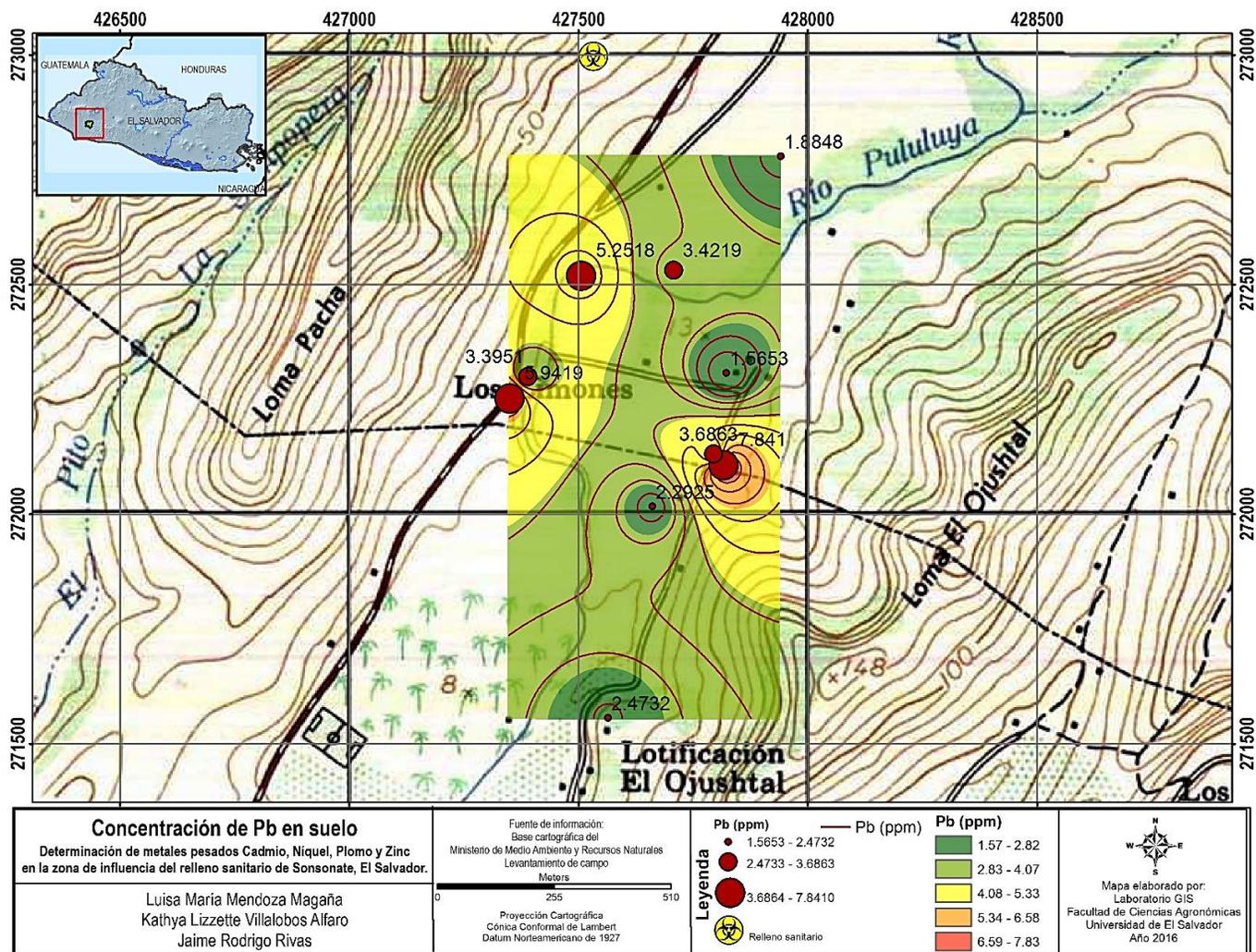


Figura 4. 5. Mapa de distribución de la concentración de Plomo obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

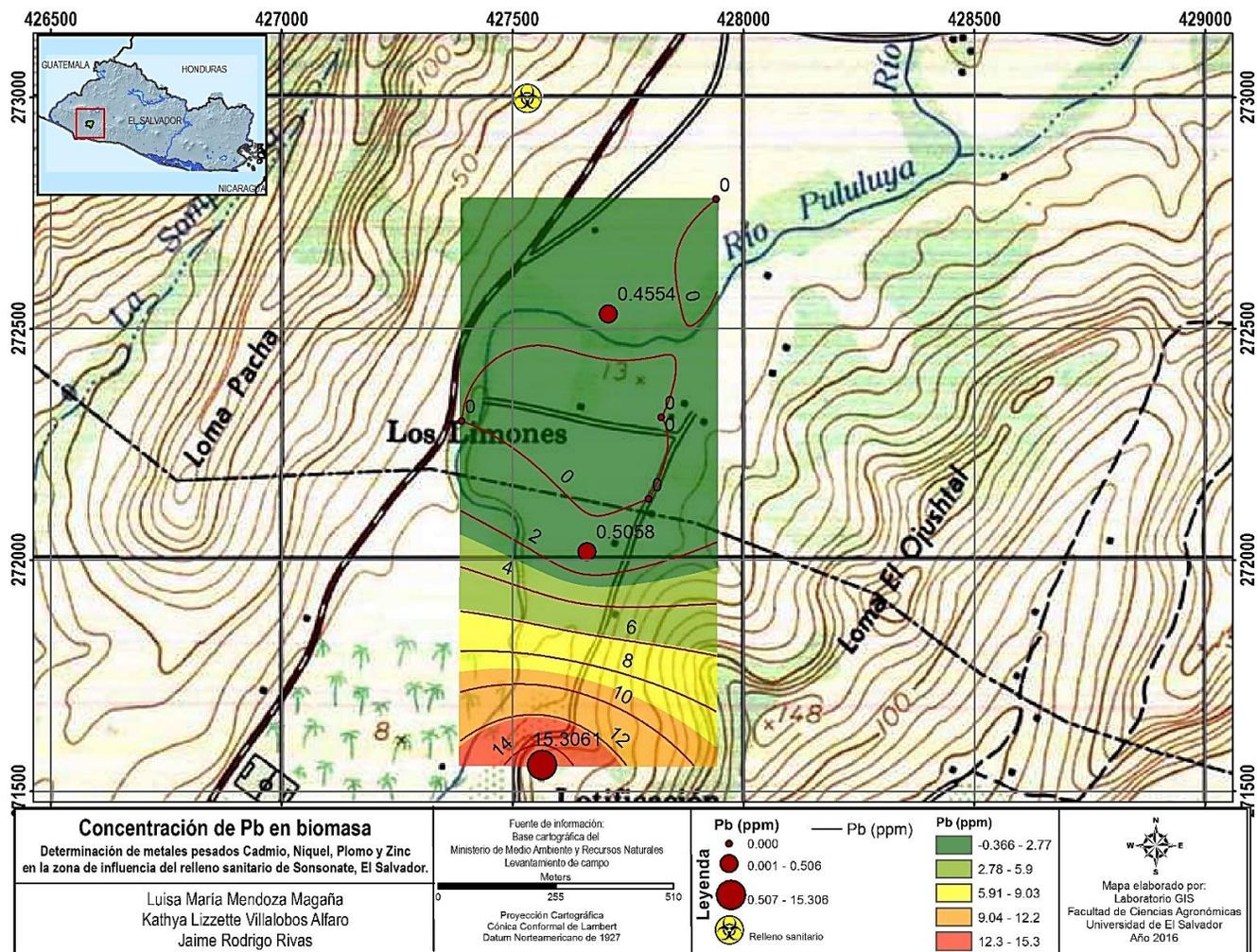


Figura 4. 6. Mapa de distribución de la concentración de Plomo obtenidas por la técnica Absorción atómica con horno de grafito en las muestras de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

III. Distribución de las concentraciones de Zinc encontradas en las matrices de analizadas en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.

En lo que respecta a la distribución de la concentración del metal Zn en las diferentes matrices analizadas se observó:

- a. Para matriz de agua superficial, la distribución de la concentración de Zn aumenta en dirección aguas abajo obteniéndose su mayor valor aproximadamente a 600 metros en dirección Sur con respecto al relleno sanitario (véase Figura 4.7).
- b. Para matriz de agua subterránea, la distribución de las mayores concentraciones de Zn se presentó a una distancia de 300 metros en dirección Sur-Este y a 1300 metros en dirección Este con respecto al relleno sanitario, luego se observó una disminución hasta aumentar nuevamente a 1500 metros al Sur con respecto al relleno sanitario (véase Figura 4.8).
- c. Para matriz de sedimento de río, al observar la Figura 4.9 la tendencia de distribución de mayor a menor concentraciones se ubicó iniciando en aguas arriba hacia aguas abajo del río Pululuya. Se identificó un aumento de las concentraciones a 500 metros del relleno sanitario, aproximadamente en el punto medio del río Pululuya, dándose nuevamente una disminución de concentraciones a medida se avanza aguas abajo del río.
- d. Para matriz de suelo, al observar la Figura 4.10 se identificó que los valores mínimos de concentraciones de Zn se encuentran a 500 metros y a 900 metros en dirección Sur-Este del relleno sanitario, luego las concentraciones presentaron un incremento a valores máximos constantes en la zona restante.
- e. Para matriz de biomasa, a 500 metros del relleno sanitario (en dirección Sur) se observó los valores máximos de concentraciones de Zn. Se identificó una disminución de concentraciones mediante se avanza en dirección Sur con respecto

al relleno sanitario llegando a su valor mínimo a 750 metros, luego se observó un incremento hasta nuevamente llegar a la máxima concentración a 1500 metros con respecto al relleno sanitario (véase Figura 4.11).

En resumen, al analizar en conjunto el comportamiento de la posible distribución del Zinc para todas las matrices estudiadas (agua superficial, agua subterránea, sedimento de río, suelo y biomasa) se observó el siguiente escenario: “La probable distribución de mayores concentraciones de Zinc se ubicó aproximadamente a 500 metros Sur-Este para las matrices de agua subterránea, suelo y biomasa luego se presentó una disminución en las concentraciones aproximadamente a un radio de 1000 metros con respecto al relleno sanitario. A excepción de las matrices de agua superficial y sedimento de río, las cuales presentan un comportamiento diferente; reflejando que la distribución de concentraciones para el agua superficial se ubicó de manera decreciente de aguas arriba hacia aguas abajo caso contrario para las matrices de sedimento de río.”

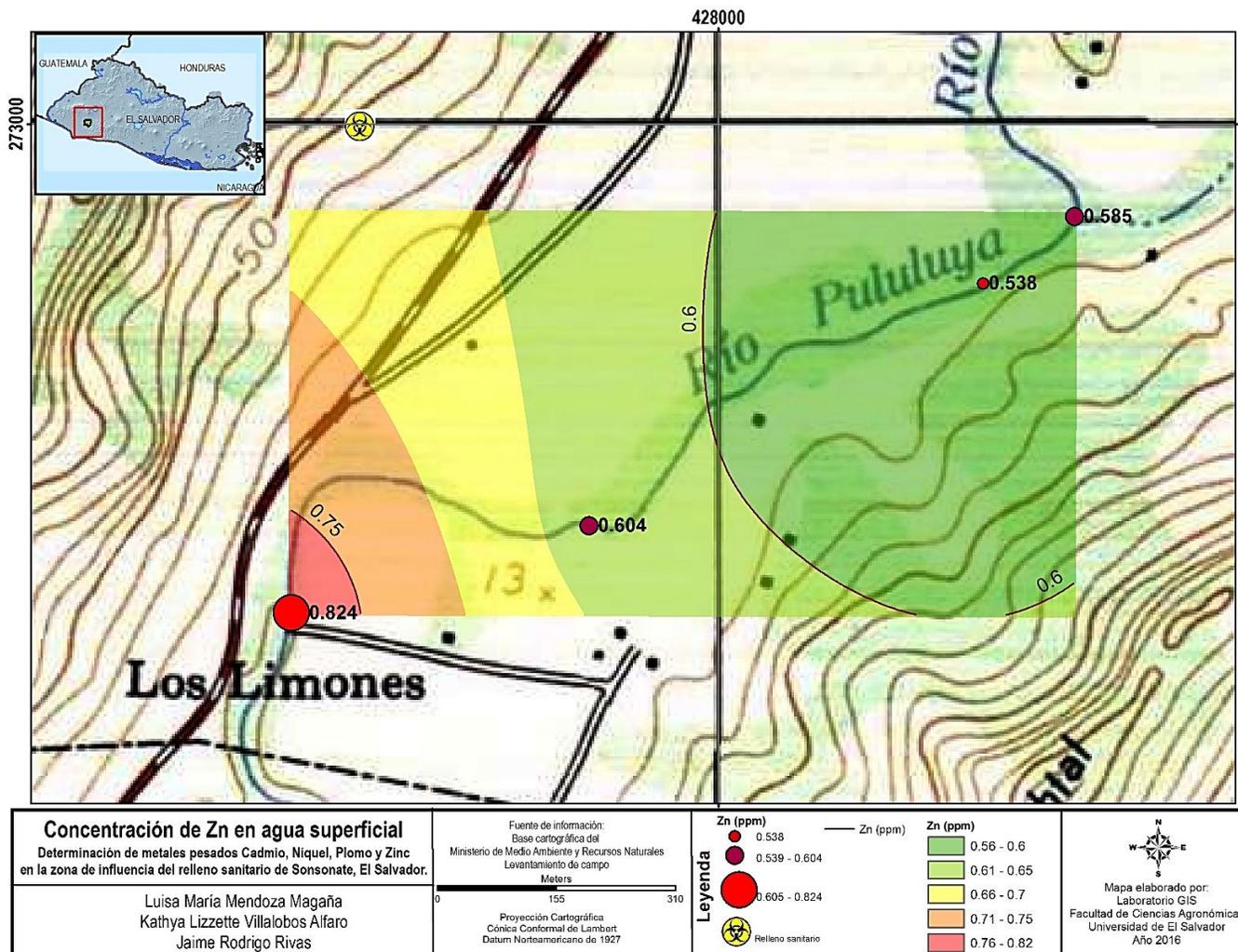


Figura 4. 7. Mapa de distribución de la concentración de Zinc obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos X por reflexión total en las muestras de la matriz de agua superficial en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

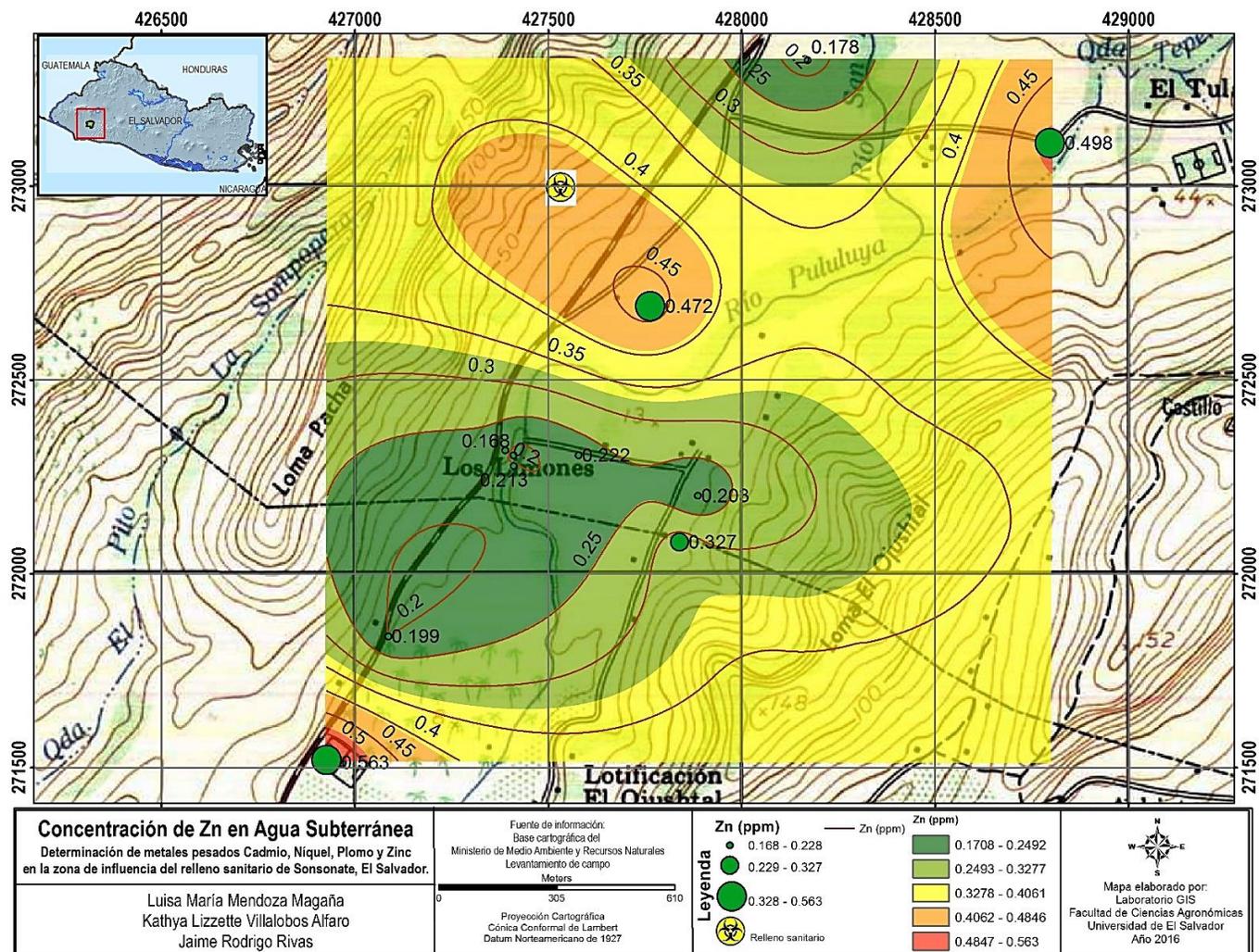


Figura 4. 8. Mapa de distribución de la concentración de Zinc obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos X por reflexión total en las muestras de la matriz de agua subterránea en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

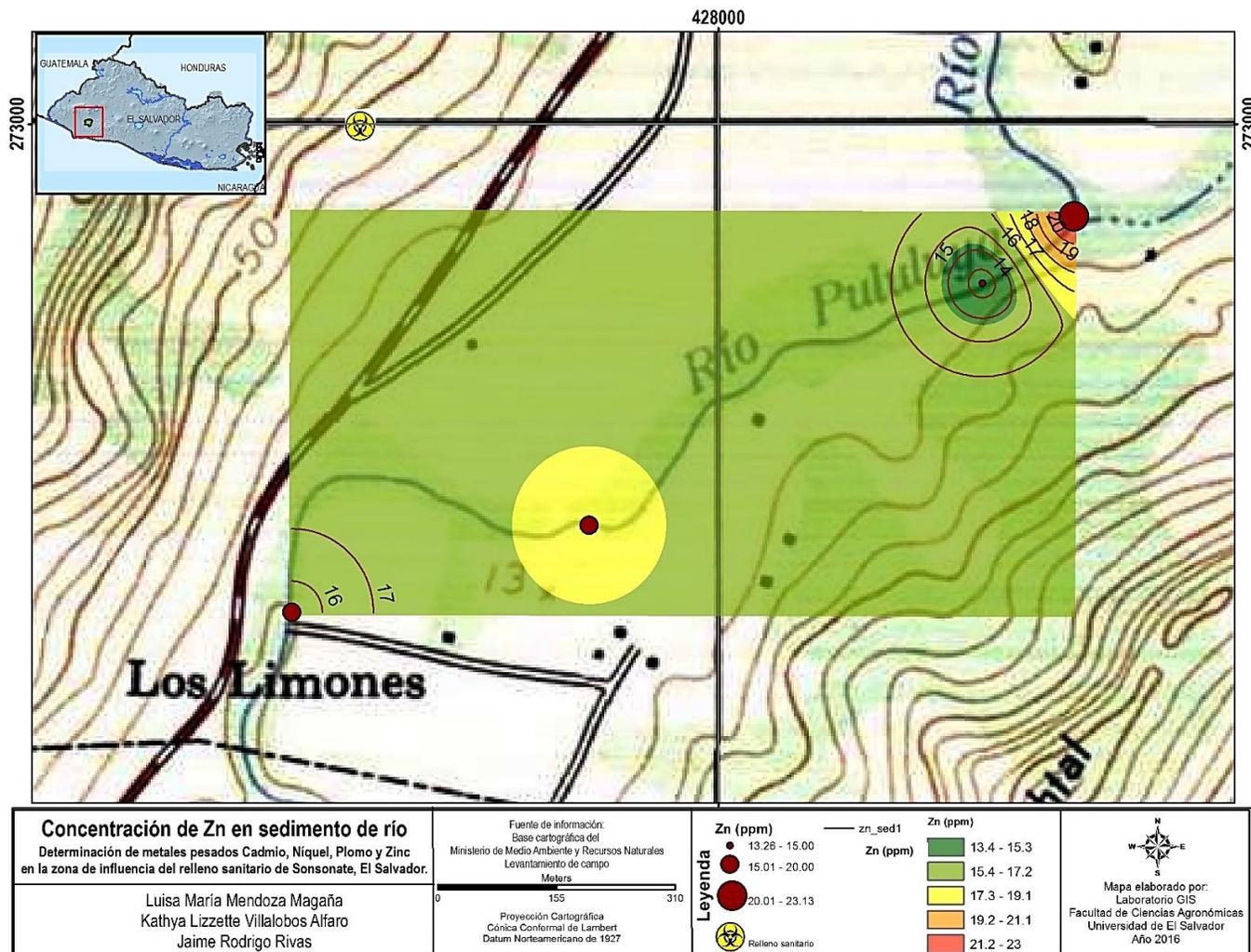


Figura 4. 9. Mapa de distribución de la concentración de Zinc obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos X por reflexión total en las muestras de la matriz de sedimento de río en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

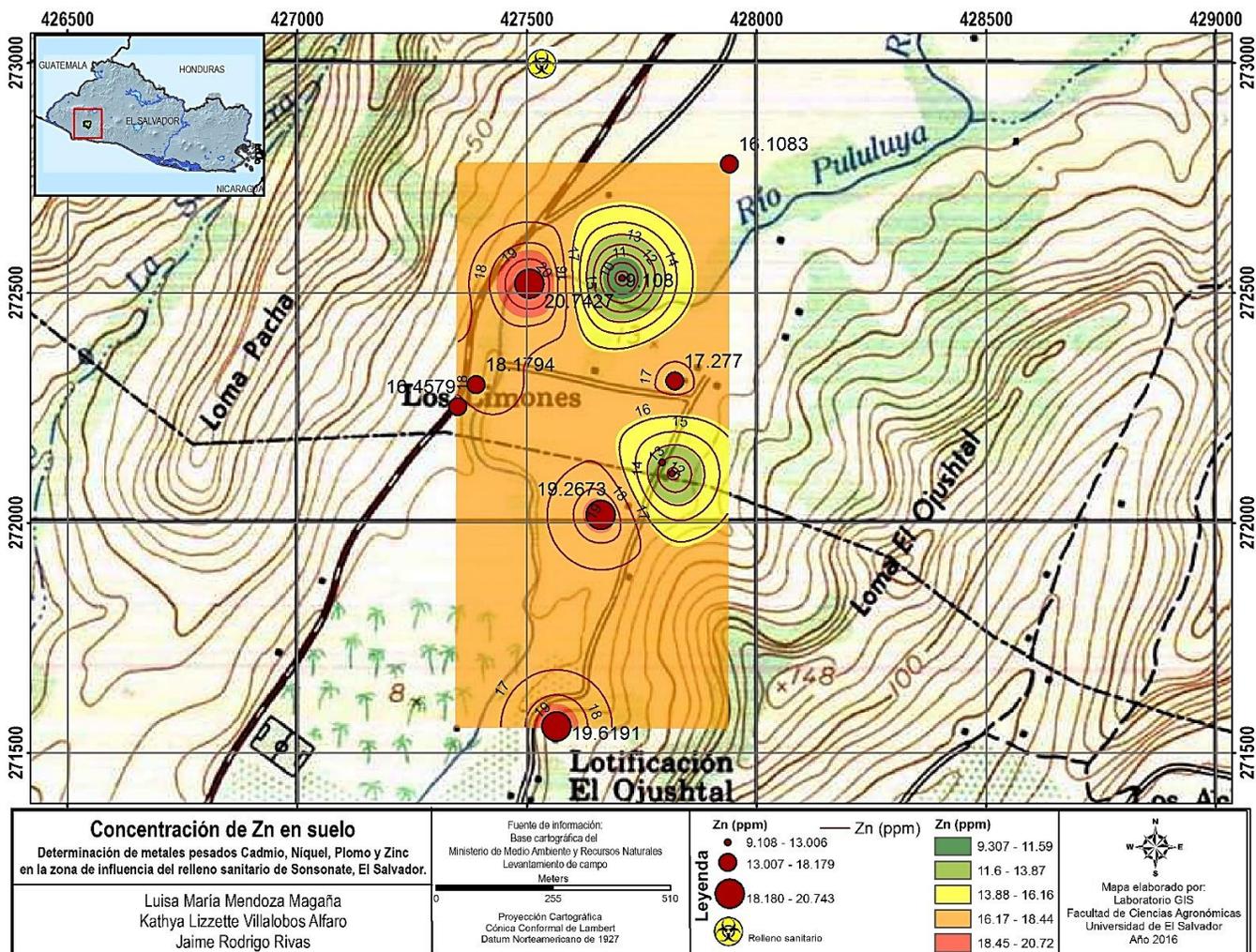


Figura 4. 10. Mapa de distribución de la concentración de Zinc obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos X por reflexión total en las muestras de la matriz de suelo en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

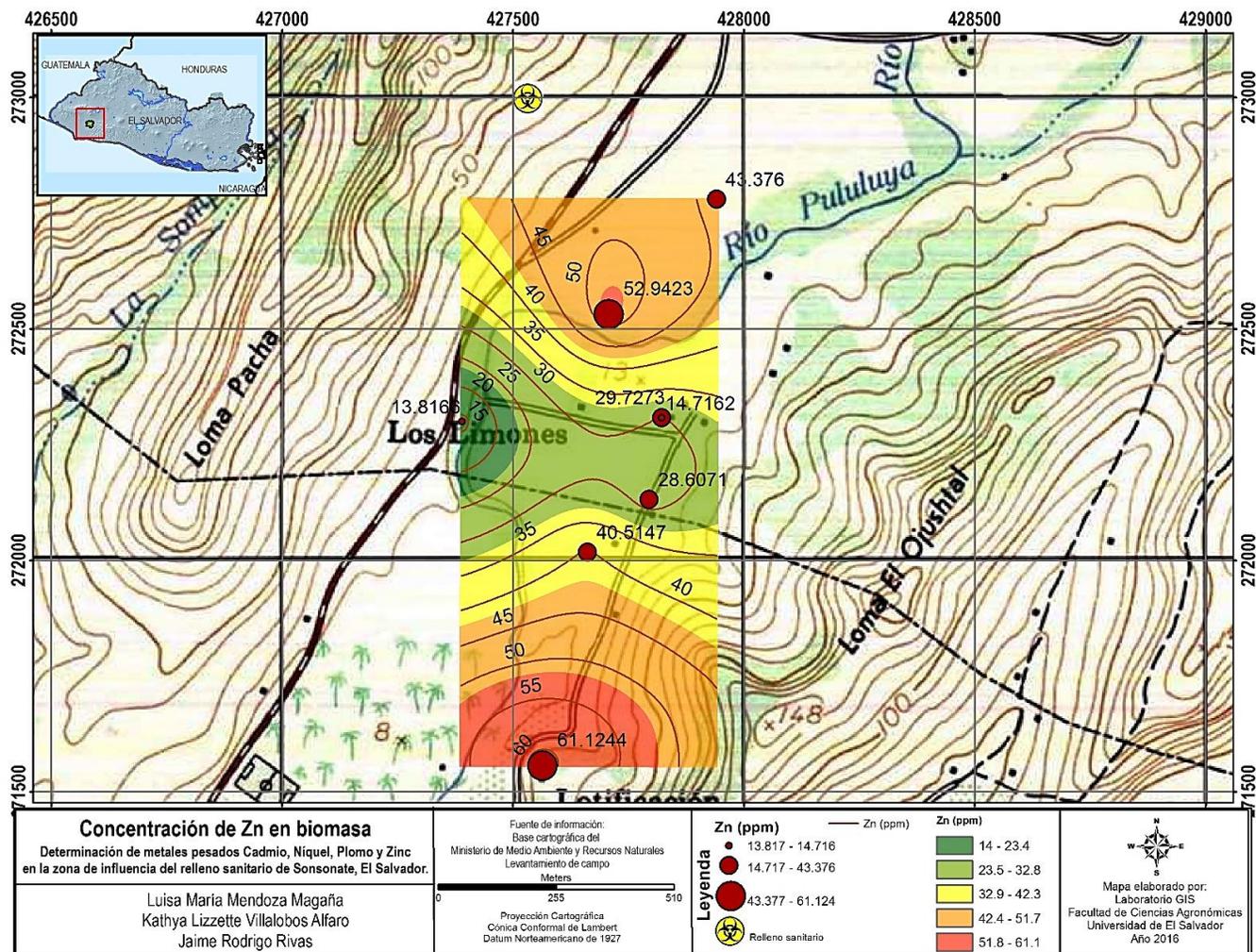


Figura 4. 11. Mapa de distribución de la concentración de Zinc obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos X por reflexión total en las muestras de la matriz de biomasa en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Noviembre 2016. Fuente: Elaboración propia por medio de ArcGIS.

## CONCLUSIONES

- ❖ Basados en los resultados obtenidos por las técnicas Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total y Espectroscopia de Absorción Atómica con horno de grafito, puede concluirse que hasta la fecha, no hay contaminación de metales Ni, Pb y Zn en la zona por la influencia del relleno sanitario, debido a que las concentraciones se encuentran dentro de los límites permitidos por las diferentes normas de referencia para las muestras analizadas a excepción de la muestra BIAYOT02 que superó el límite para Pb con 15.31 ppm Pb.
- ❖ En relación a los coeficientes de absorción aparente de metales encontrados para la matriz biomasa, se encontraron valores superiores a 1, tales como 5.8127 para el caso del metal Zinc, y 6.1889 para el caso de Plomo, por lo cual se concluye que probablemente pueden existir otros factores externos relacionados con la absorción de metales como lo podrían ser el uso de pesticidas, fertilizantes, el tipo de agua de riego, entre otros.
- ❖ Según lo reflejado en los resultados, es probable que durante la época seca existe mayor probabilidad de encontrar presencia de metales Níquel, Plomo y Zinc en matrices de suelo y sedimento de río. Para la matriz de sedimento de río, esto se debe a que se ven menos afectados por factores como el caudal del río y se dan las condiciones propicias para la sedimentación de dichos metales; y para la matriz de suelo, se debe a que no es afectado por factores como las escorrentías, entre otros.

## RECOMENDACIONES

- ❖ Para hacer uso de la técnica de análisis Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total como única técnica de cuantificación, se recomienda una evaluación previa al porta muestra, contemplar un blanco para etapa de digestión, elaborar curva de calibración con al menos tres concentraciones diferentes del estándar multi elemento y la realización de una curva específica para líneas  $L_{\beta}$  en la cuantificación de metales que no pueden ser leídos sus energías en líneas  $K_{\alpha}$ .
- ❖ Para la cuantificación del metal Níquel no es recomendable el uso de la técnica Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total cuando la recubierta del detector esté fabricada de este metal, ya que esta aporta significativamente a los resultados.
- ❖ Por los niveles de concentración de metales encontrados, se recomienda para futuras investigaciones en la zona de influencia del Relleno Sanitario de la Región Metropolitana de Sonsonate, el uso de la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito, ya que posee una mayor especificidad y sensibilidad que otras técnicas de análisis convencionales.
- ❖ Para el modelado de concentraciones en el programa ArcGIS, se recomienda el análisis en la mayor cantidad de puntos posibles para cada matriz, representando así de una forma precisa la distribución de concentraciones en la zona de estudio.
- ❖ Los metales pesados siendo bioacumulables en el tiempo, deben de ser constantemente monitoreados, para la evaluación del posible aumento en las concentraciones de los mismos. Además, deben realizarse estudios durante un año hidrológico, para considerar la posible movilización de los metales pesados por acción del agua lluvia por medio de escorrentías e infiltraciones.

- ❖ Se recomienda que, para futuras investigaciones, en aguas superficiales se realice un estudio más detallado de los sedimentos de río; ya que, de acuerdo a lo demostrado en el presente trabajo, las concentraciones encontradas en sedimento son más fácilmente detectables (más significativas) con los equipos de Espectroscopia de Absorción Atómica con Horno de Grafito y Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total, para los metales Níquel, Plomo y Zinc.
  
- ❖ Realizar una investigación posterior detallada para los diferentes tipos de cultivos (hortalizas, granos básicos, frutas y verduras, etc.) de la zona en donde se encontró la muestra de cultivo BIA YOT02, para determinar cuáles son las posibles causas por las que se encontró una alta concentración de Plomo en dicha muestra.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adriano, D. C. (1992). *Biogeoquímica de metales traza*. Editores de Lewis. Boca Ratón, Estados Unidos.
2. Agencia de Protección Ambiental (1992). *Método 3005A. Digestión acida de aguas para el análisis de contenido total de metales recuperables o disueltos por espectroscopia ICP o FLAA*. Recuperado a partir de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documentos/3005a.pdf>
3. Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos*. Recuperado a partir de <https://www.epa.gov/sitios/producción/archivos/2015-06/documentos/EPA-3050b.pdf>
4. Agencia de Protección Ambiental (2009). *Directrices recursos de muestreos y análisis de aguas, aguas residuales, suelos y residuos industriales*. Publicación: IWRG701 Junio 2009. Recuperado a partir de <http://www.epa.vic.gov.au/~media/Publications/IWRG701.pdf>
5. Agencia Internacional de Energía Atómica (1997). *Limpieza de los reflectores de muestra. Muestreo, almacenamiento de las muestras y procedimientos de preparación para Fluorescencia de Rayos X, análisis de los materiales de entorno*. Viena.
6. Agencia Internacional de Energía Atómica (2009). *Análisis de fluorescencia de rayos-X por reflexión total*. Recuperado a partir de <http://www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-51/html/index.html>
7. Alloway, B. J. (1995a). *Cadmio. Es: los metales pesados en los suelos*. Editorial Blackie Academic Publisher y Professional. Nueva York.

8. Alloway, B. J. (1995b). *El origen de los metales pesados en los suelos. Es: los metales pesados en los suelos*. Editorial Blackie Academic Publisher y Professional. Nueva York.
9. Alloway, B. J. (1995c). *La movilización de elementos traza en los suelos. Es: suelos contaminados*. 3ª Conferencia Internacional sobre la Biogeoquímica de Elementos Traza. París.
10. Alvarado Alfaro, I. P., Amador Torrealba, O. L. y Cuéllar López, R. E. (2012). *Propuesta de un sistema de gestión integral de residuos sólidos municipales en el municipio de Ayutuxtepeque, San Salvador, El Salvador*. Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/1643/>
11. AOAC (1999). *Método Oficial 999.11. Determinación de Cadmio, Cobre, Hierro, Plomo y Zinc en los alimentos por espectrofotometría e absorción atómica después de calcinación en seco*. Recuperado a partir de <http://img.21food.cn/img/biaozhun/20100108/177/11285282.pdf>
12. Araujo Chévez, C. I. (2010). *Cuantificación de Plomo, Mercurio y Cadmio en agua de consumo humano de cinco comunidades de El Salvador por espectrofotometría de absorción atómica*. Trabajo de Graduación. Facultad de Química y Farmacia. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/2370/>
13. Arias, M. L. y Díaz, J. (2004). *Contaminación por Pilas y Baterías en México*. Instituto Nacional de Ecología, México.

14. Baker, A. J. M. (1981). *Estrategias de acumuladores y excluidores en las plantas como respuesta a los metales pesados*. Revista Plant Nutrition.
15. Banco Central de la Reserva (2016). *Base de Datos del Comercio Exterior*. San Salvador, El Salvador.
16. Barceló, J. y Poschenrieder, C. (2003). *Fitoremediación: principios y perspectivas*. Ediciones del Instituto de Estudios de Catalán. Revista de Contribuciones a las Ciencias. Barcelona.
17. Bautista Zúñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales, FMVZ, UADY. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
18. Beauchaine, M. (2012). *Revisión de las aplicaciones de TXRF para el análisis de elementos traza*. Bruker AXS Inc. Recuperado a partir de [http://chemistry.fas.nyu.edu/docs/IO/26588/Mike\\_Beauchaine\\_TXRF.pdf](http://chemistry.fas.nyu.edu/docs/IO/26588/Mike_Beauchaine_TXRF.pdf)
19. Bourg, A. C. M. (1995). *La especiación de metales pesados en suelos y aguas subterráneas, implicaciones para su naturaleza y su movilidad. Es: metales pesados*. Editorial Springer-Verlag Berlín Heidelberg.
20. Buatier, M. D., Sobanska, S. y Elsass, F. (2001). *Investigación en suelos contaminados con Pb y Zn*. Revista Geoquímica Aplicada.
21. Burt, R., Dougherty, B. D., Keck, T. J., Lindahl, J. A., Wilson, M. A. y Strom, D. E. (2003). *La especiación de elementos traza en suelos contaminados fundición y seleccionada en la Anaconda, Montana, EE.UU.* Revista Los avances en la investigación ambiental.

22. Canadian Council of Ministers of The Environment (2015) *Scientific Criteria Document for Canadian Soil Quality Guidelines for The Protection of Environmental and Human Health*. Recuperado a partir de: <http://www.ccme.ca/files/ceqg/en/Ni%20SQG%20SCD.pdf>
23. Cuadra Zelaya, C. D. y Romero García, D. A. (2006). *Aplicación de biomonitores para evaluar la contaminación por metales pesados en el Lago Suchitlan*. Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/2019/>
24. Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (1994). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. Recuperado a partir de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/cd-cagua/normas/lac/13.NIC/01.norma.pdf>
25. Davies, E. B. (1995). *Plomo. Es: los metales pesados en los suelos*. Editorial Blackie Academic Publisher y Professional. Nueva York.
26. De la Cerda, J. M., Lara, J. L., Lira, R.G., Rodríguez, F. H. y Rodríguez, J. C. (2006). *Capacidad de seis especies vegetales para acumular Plomo en suelos contaminados*. Revista Fitotecnia Mexicana.
27. Dean, J. e Intawongse, M. (2006). *La captación de metales pesados por las plantas vegetales cultivadas en suelo contaminado y su biodisponibilidad en el tracto gastrointestinal humano*. Revista Aditivos Alimentarios y Contaminantes.

28. Del Razo, L. M., Lucho, C. A., Poggi, H., Prieto, F. y Rodríguez, R. (2005b). *Fraccionamiento químico de Boro y metales pesados en los suelos regados con aguas residuales en el centro de México*. Revista La Agricultura, Los Ecosistemas y El Medio Ambiente.
29. Dirección General de Aduana de El Salvador (2016). *Sistema Arancelario*. San Bartolo, Ilopango. Recuperado a partir de <http://appm.aduana.gob.sv/sacelectronico/Default.aspx>
30. Dirección General de Saneamiento (2016). *Respuesta a solicitud realizada a OIR-MARN*. San Salvador, El Salvador.
31. Elkhatib, E.A., Fathi, N.O. y Mahdy A. M. (2007). *Cadmio, Cobre, Níquel, Plomo y su disponibilidad en biosólidos-suelos alcalinos*. Journal Australiano de Ciencias Básicas y Aplicadas.
32. Environmental Protection Agency (2002) *Federal Water Pollution Control Act*. Estados Unidos. Recuperado a partir de: <http://www.epw.senate.gov/water.pdf>
33. Fuente Merino, I. (2015). *Puesta a punto de un equipo de fluorescencia de rayos X portátil con fuentes radiactivas: Aplicaciones Medioambientales*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, España. Recuperado a partir de <http://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/6787>
34. Giuliano, V., Moscardini, E., Pagnanelli, F. y Toro, L. (2004). *Secuencia de extracción de metales pesados en los sedimentos del río de una zona minera abandonada Pirita: La detección de la contaminación y de la Serie Affinity*. Revista La contaminación del medio ambiente.

35. Gómez, I., Mataix, J., Moral, R., Navarro, J. y Palacios, G. (1994). *Distribución y acumulación de metales pesados (Cd, Ni y Cr) en la planta de tomate*. Editorial Fresenius. Boletín Ambiental.
36. Guzmán, F. A., López, P., Prieto, F., Román, A.D. y Santos, E.M. (2005). *Evaluación de la calidad física de diferentes variedades de cebada (hordeum sativum jess) cultivadas en los estados de Hidalgo y Tlaxcala, México*. Revista Chilena de Nutrición.
37. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Centro de Ciencias de la Atmosfera (2010). *Guía para elaborar planes de muestreo representativos*. México. Recuperado a partir de [http://www2.inecc.gob.mx/dgcnica/proname/informes/guia\\_para\\_\\_planes\\_de\\_\\_muestreo\\_inecc\\_2013.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/dgcnica/proname/informes/guia_para__planes_de__muestreo_inecc_2013.pdf)
38. Kabata Pedias, A. (2000). *Elementos traza en suelos y plantas*. Editor CRC Press. Boca Ratón, EE.UU.
39. Lema, H. L. y Martínez, C. E. (2000). *La solubilidad de Plomo, Zinc y Cobre añadido a los suelos minerales*. Revista La contaminación del medio ambiente.
40. Lexmond, T. M., Temminghoff, E. J. M., Van Riemsdijk, W. H., Weng, L. P. y Wolthoorn, A. (2004). *La comprensión de los efectos de las características del suelo sobre la fitotoxicidad y la biodisponibilidad de Níquel utilizando modelos de especiación*. Revista Ciencia y Tecnología del Medio Ambiente.
41. Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezométricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena. Recuperado a partir de [http://www.upct.es/~minaees/practica2 \\_ explicacion.pdf](http://www.upct.es/~minaees/practica2 _ explicacion.pdf)

42. Martínez García, R. (2007). *Determinación de metales pesados en la precipitación pluvial de una zona urbana (Ciudad de México) y de una zona rural (Rancho Viejo, Edo. de México)*. Tesis de Posgrado. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado a partir de <http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/RocioGarciaTesis07.pdf>
43. McGrath, S. P., Rooney, C. P., y Zhao, F. J., (2006). *La fitotoxicidad de Níquel en una gama de suelos europeos: Influencia de las propiedades del suelo, la solubilidad de Ni y especiación*. Revista Contaminación del Medio Ambiente.
44. Megharaj, M., Naidu, R., Sethunathan, N. y Vig, K. (2003). *La biodisponibilidad y la toxicidad del Cadmio a los microorganismos y sus actividades en el suelo*. Revista Los avances en la Investigación Ambiental.
45. Ministerio de la Presidencia (2005) *Real Decreto 9/25*. España. Recuperado a partir de: <http://eca-suelo.com.pe/wp-content/uploads/2014/04/4.4.pdf>
46. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2006). *Segundo Censo Nacional de Desechos Sólidos Municipales*. San Salvador, El Salvador.
47. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). *Estadísticas*. San Salvador, El Salvador.
48. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2010). *Plan para el Mejoramiento del Manejo de Desechos Sólidos en El Salvador*. San Salvador, El Salvador. Recuperado a partir de [http://www.opinandoenelsalvador.com/wp-content/uploads/2010/10/programa\\_nacionaldesechossolidos2010.pdf](http://www.opinandoenelsalvador.com/wp-content/uploads/2010/10/programa_nacionaldesechossolidos2010.pdf)

49. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). *MARN inspecciona el relleno sanitario de Sonsonate afectado por las lluvias*. Recuperado a partir de [http://marn.gob.sv/index.php/c1-noticias-ciudadano/marn-inspecciona-el-relleno-sanitario -de-sonsonate-afectado-por-las-lluvias/](http://marn.gob.sv/index.php/c1-noticias-ciudadano/marn-inspecciona-el-relleno-sanitario-de-sonsonate-afectado-por-las-lluvias/)
50. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012). *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo para los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)*. San Salvador, El Salvador.
51. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Respuesta a solicitud realizada a OIR-MARN*. San Salvador, El Salvador.
52. Ministerio de Salud (2009) *Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08*. Segunda actualización. San Salvador, El Salvador. Recuperado a partir de: [http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/normas/NORMA\\_AGUA\\_POTABLE\\_2\\_a.pdf](http://usam.salud.gob.sv/archivos/pdf/normas/NORMA_AGUA_POTABLE_2_a.pdf)
53. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (2007). *Plan de Emergencia Sanitario Local*. Unidad de Salud de Sonsonate “Manuel Roberto Arce”. Sonsonate, El Salvador. Recuperado a partir de <http://asp.salud.gob.sv/desastres/PDF/doc88/doc88-contenido.pdf>
54. Motsara, M. R. y Roy, N. R. (2008). *Guía de laboratorio para el análisis de nutrientes*. Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas. Roma, Italia. Recuperado a partir de <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/fpnb19.pdf>
55. Nieboer, E. y Richardson, D. S. (1980). *La sustitución de los metales pesados anodinos, plazo por clasificación biológica y químicamente significativa de iones metálicos*. Reinart. Contaminación / Ser.

56. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y La Agricultura y Organización Mundial de la Salud (2015). *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas presentes en Los Alimentos y Piensos CODEX STAN 193-1995*. Recuperado a partir de: [http://www.aupsa.gob.pa/aupsaweb/Descargas/Documentosdeinteres/doc\\_Codex\\_norma\\_general\\_contaminantes\\_toxinas.pdf](http://www.aupsa.gob.pa/aupsaweb/Descargas/Documentosdeinteres/doc_Codex_norma_general_contaminantes_toxinas.pdf)
57. Ortez Sandoval, A. E. y Parada Arévalo, K. R. (2008). *Propuesta para la gestión ambiental de pilas y baterías (dispositivos electroquímicos generadores de energía) fuera de uso en El Salvador*. Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/2620/>
58. Prieto Méndez, J., Prieto García, F., González Ramírez, C. A. y Román Gutiérrez, A. D. (2009). *Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua*. Revista Agroecosistemas Tropicales y Subtropicales. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>
59. Quinteros Escalante, H. E. D., Ramírez Morataya, B. J. G. y Ramos Orantes, J. A. (2013). *Evaluación de contaminación por metales pesados en la cuenca baja del río San Antonio, municipio de Nejapa*. Trabajo de Graduación. Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/5013/>
60. Rauret, G., Rigol, A. y Sauquillo, A. (2003). *Información general sobre el uso de ensayos de lixiviación de extracción para la Evaluación de Riesgos de metales traza en suelos contaminados y sedimentos*. Revista Tendencias en Química Analítica.
61. Razmilic, B. (2015). *Control de calidad de insumos y dietas acuícolas*. Recuperado a partir de <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/ab482s04.html>

62. Rivera Acosta, F. P., y Aparicio Monjaras, O. R. J. (2009). *Evaluación geoelectrica del antiguo botadero de residuos sólidos urbanos de Mariona*. Trabajo de Graduación. Escuela de Física. Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Universidad de El Salvador, San Salvador. Recuperado a partir de <http://ri.ues.edu.sv/8436/>
63. Sauerbeck, D. R. (1991). *Planta, elementos y propiedades del suelo que regulan la absorción y disponibilidad de metales pesados derivados de lodos de depuradora*. Revista Contaminación del agua, aire y suelo.
64. Thermo Fisher Scientific (2016). *Espectrofotómetro de Absorción Atómica iCE™ 3000*. Recuperado a partir de <https://www.thermofisher.com/sv/en/home/brands/thermo-scientific.html>
65. Umaña Granados, J. G. (1999). *Estudio de Impacto Ambiental del Relleno Sanitario de Sonsonate*. Alcaldía Municipal de Sonsonate. Sonsonate, Sonsonate.
66. Universidad de Barcelona (2012). *Operaciones Básicas en el Laboratorio de Química. Metodología. Limpieza del Material de Laboratorio*. Recuperado a partir de <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/neteja.html>

## GLOSARIO

**Absorción atómica:** es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos químicos, por lo que sus campos de aplicación son variados.

**Acuíferos confinados o cautivos:** son aquellos en los cuales el agua que contienen está sometida, en cada punto X del acuífero, a una presión mayor a la atmosférica, y que es distinta en cada punto del acuífero.

**Acuíferos libres:** son aquellos en los cuales el agua del nivel superior de la zona saturada se encuentra a presión atmosférica, están constituidos por formaciones geológicas permeables, directamente expuestas a la recarga por parte de la lluvia, que contienen la franja saturada del terreno y que, habitualmente, no están saturadas en todo su espesor.

**Agua subterránea:** es el agua situada por debajo de la superficie del suelo en los espacios porosos del suelo y en las fracturas de las formaciones rocosas.

**Agua superficial:** es la proveniente de las precipitaciones, que no se infiltra ni regresa a la atmósfera por evaporación o la que proviene de manantiales o nacimientos que se originan de las aguas subterráneas.

**Analito:** es un componente (elemento, compuesto o ion) de interés analítico de una muestra. Es una especie química cuya presencia o contenido se desea conocer, identificable y cuantificable, mediante un proceso de medición química.

**Biomasa:** es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

**Cuarteo:** reducir la muestra hasta la cuarta parte de forma representativa del total realizando el mismo proceso en dos ocasiones.

**Cuenca:** accidente geográfico, superficie rodeada de alturas, o cuenca hidrográfica, territorio drenado por un sistema de drenaje natural.

**Desechos sólidos:** conjunto de materiales sólidos de origen orgánico e inorgánico (putrescible o no) que no tienen utilidad práctica para la actividad que lo produce, siendo procedente de las actividades domésticas, comerciales, industriales y de todo tipo que se produzcan en una comunidad, con la sola excepción de las excretas humanas.

**Espectro:** los espectros son imágenes o registros de un objeto (que puede ser desde una estrella hasta una molécula o átomo) de la energía que absorbe o emite. Anteriormente, los químicos ponían a la flama las sustancias químicas y de acuerdo a la intensidad y colores de la llama, podían averiguar que átomos o compuestos contenía la muestra.

**Estándar interno:** es una sustancia que se añade a todas las muestras en una cantidad constante. El estándar interno (IS) puede compensar distintos tipos de errores indeterminados y sistemáticos.

**Fluorescencia de rayos X por reflexión total:** es una técnica de muestreo versátil, rápida y no destructiva (en algunos casos en los que la penetración de los rayos X no fuera suficiente se requerirían cortes o pulidos, dependiendo también de la uniformidad de la muestra) relativamente nueva, que reconoce un gran número de elementos químicos.

**Fluorescencia de rayos X:** Es la técnica basada en el estudio de las emisiones de fluorescencia generadas después de la excitación de una muestra mediante una fuente de rayos X.

**Fotón:** esta partícula se mueve a la velocidad de la luz porque no es una partícula material, su masa es nula. Los fotones son producidos por cargas eléctricas en movimiento; las cargas eléctricas producen simultáneamente fuerzas eléctricas y magnéticas que se propagan en el espacio a la velocidad de la luz como ondas electromagnéticas.

**Lixiviado:** líquido resultante de un proceso de percolación de un fluido a través de un sólido. El lixiviado generalmente arrastra gran cantidad de los compuestos presentes en el sólido que atraviesa.

**Metal Pesado:** es un miembro de un grupo de elementos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas. Los metales pesados tóxicos más conocidos son el Mercurio, el Plomo, el Cadmio y el Arsénico, en raras ocasiones, algún no metal como el Selenio.

**Monitoreo:** es el proceso sistemático de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento al progreso de un programa en pos de la consecución de sus objetivos, y para guiar las decisiones de gestión.

**Nivel freático:** cota absoluta (en m sobre el nivel del mar) que corresponde a la parte superior de saturación en un acuífero libre. Es una variable de significado puntual, pues la cota del agua varía espacialmente en el terreno.

**Nivel piezométrico:** al perforar un pozo en un acuífero confinado, el agua se descomprime y asciende por la entubación hasta alcanzar una posición por situada por encima del techo del acuífero. La altura (cota absoluta sobre el nivel del mar) que alcanza el agua se denomina nivel piezométrico. Un nivel piezométrico corresponde siempre a la presión existente sobre el punto del acuífero en el cual está ranurado el pozo o sondeo.

**Pedología:** es el estudio de los suelos en su entorno natural. Es una rama de la Geografía y a la vez una de las ramas principales de las ciencias del suelo, junto a la edafología, la mecánica de suelos, la química de suelos y la microbiología de suelos.

**Permeabilidad:** es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

**Rayos X:** son radiaciones electromagnéticas, como lo es la vida visible, o las radiaciones ultravioleta e infrarroja, invisible para el ojo humano, capaz de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas; lo único que los distingue de las demás radiaciones electromagnéticas es su llamada longitud de onda.

**Relleno sanitario:** es un lugar destinado a la disposición final de desechos o basura, en el cual se toman múltiples medidas para reducir los problemas generados por otro método de tratamiento de la basura como son los tiraderos.

**Sedimento:** es una mezcla compleja de distintas fases, entre las que se pueden distinguir, principalmente, las arcillas (filosilicatos), carbonatos, óxidos de hierro y manganeso, materia orgánica (ácidos húmicos y fúlvicos) y arena (sílice).

**Superficie freática:** es la superficie que limita superiormente la zona saturada de un acuífero libre.

**Superficie piezométrica:** es una superficie (dos dimensiones, X e Y) virtual que representa la geometría que une los puntos que señalan la altura del agua en un acuífero, referida a una determinada profundidad en el mismo.

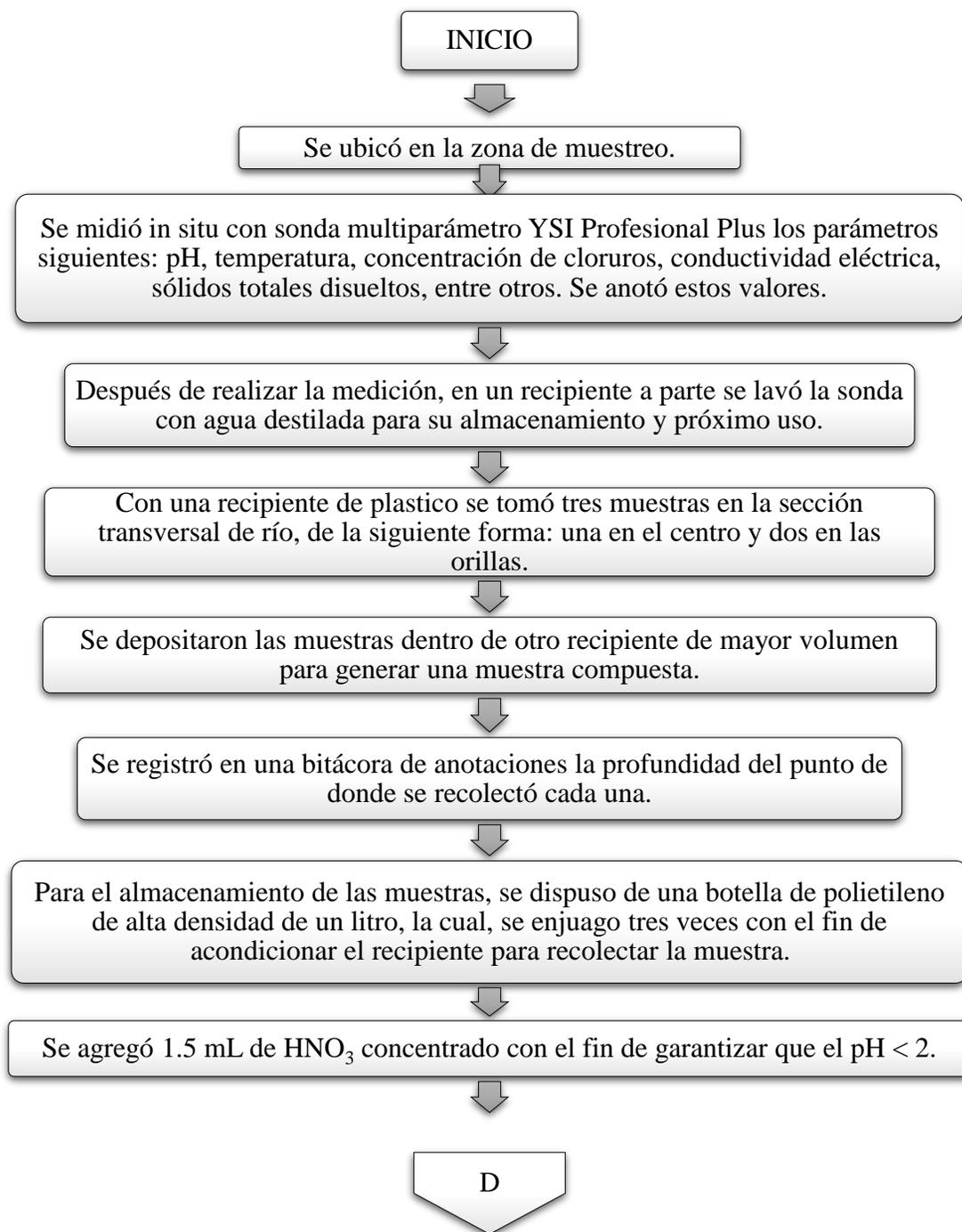
**Superficies piezométricas:** son representaciones virtuales de la geometría de la superficie que une los puntos que señalan la altura del agua en un acuífero (o sector de acuífero) referida a una determinada profundidad en el mismo.

**Topografía:** es la ciencia encargada de describir físicamente la superficie de la tierra, describiendo sus accidentes y características. Además, establece los métodos y procedimientos para llevar a cabo estas descripciones.

**Zona o área de influencia:** es el territorio donde potencialmente se manifiestan los impactos de la obra sobre la totalidad del medio ambiente o sobre alguno de sus componentes naturales, sociales o económicos. Incluye al área operativa, área de influencia directa e indirecta, y su delimitación debe realizarse a través de un equipo interdisciplinario que evalúe la extensión del espacio donde se manifiestan en forma significativa los impactos de la obra.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1. Metodología de recolección de muestras para la matriz de agua superficial.



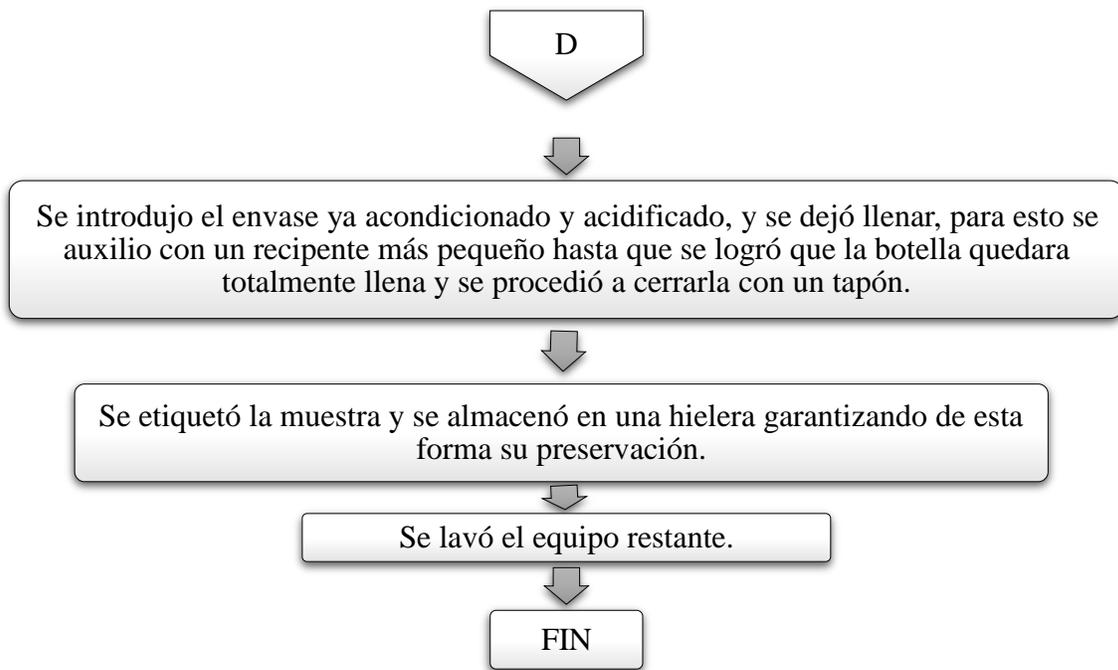
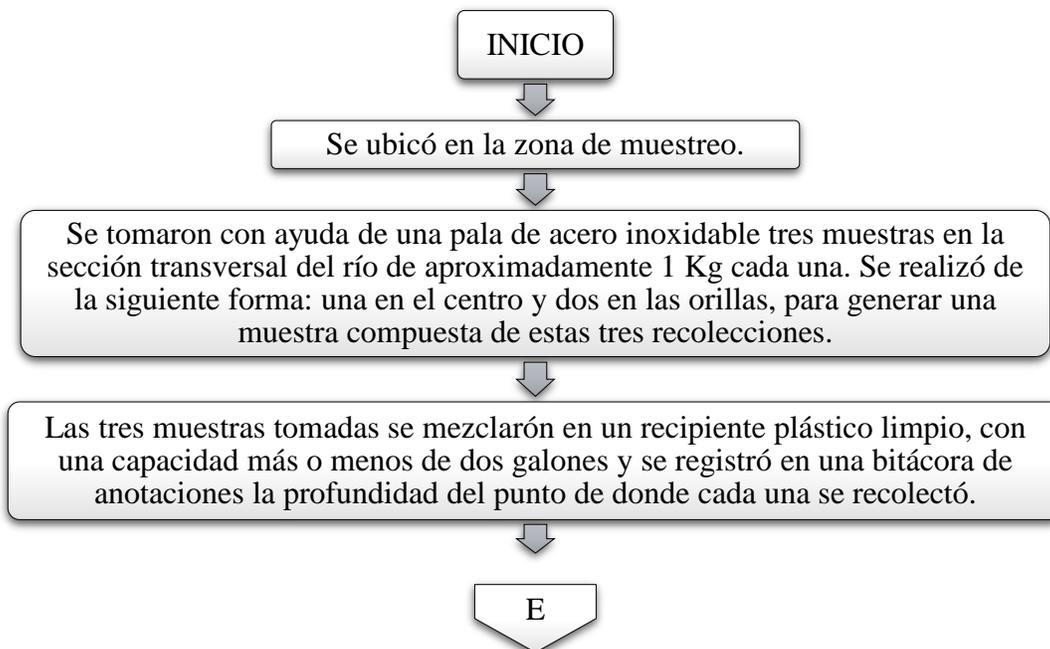


Figura A. 1. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de agua superficial. Fuente: Elaboración propia utilizando como base el Manual de Protocolos Armonizados y Evaluados para la toma de muestra y el Análisis de Aguas y Sedimentos para la Región de América Latina y El Caribe, método Pt-Mu-02 y método Pt-Mu-03.

## **ANEXO 2. Metodología de recolección de muestras para la matriz de sedimento.**



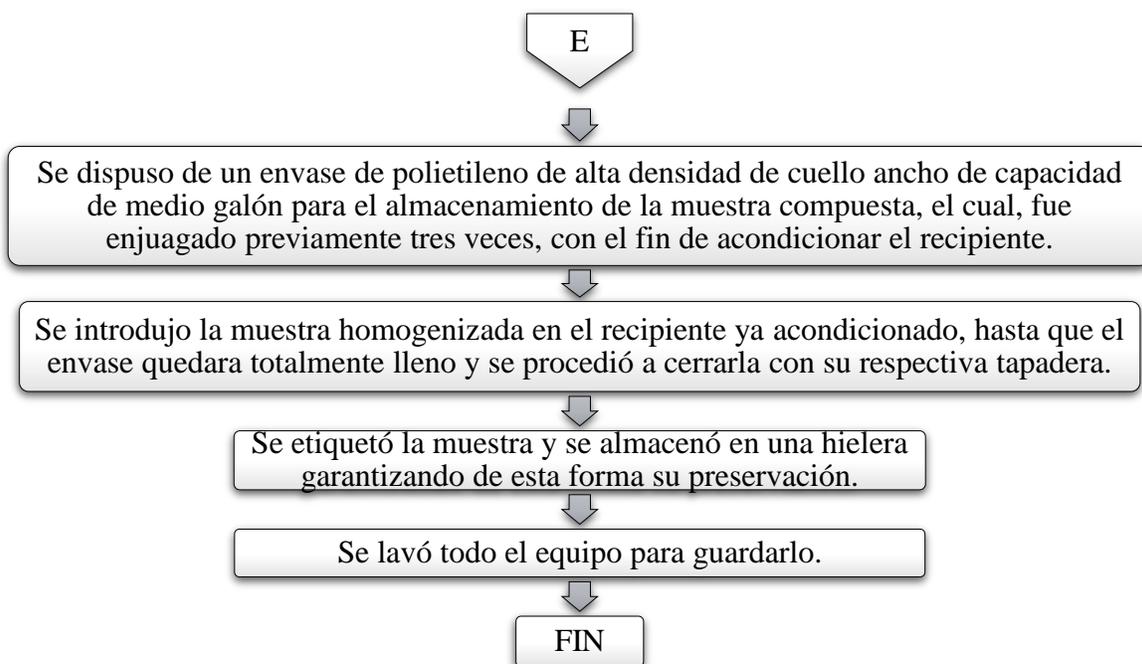


Figura A. 2. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de sedimento. Fuente: Elaboración propia utilizando como base el Manual de Protocolos Armonizados y Evaluados para la toma de muestra y el Análisis de Aguas y Sedimentos para la Región de América Latina y El Caribe, método Pt-Mu-02 y método Pt-Mu-03.

### ANEXO 3. Metodología de recolección de muestras para la matriz de agua subterránea.

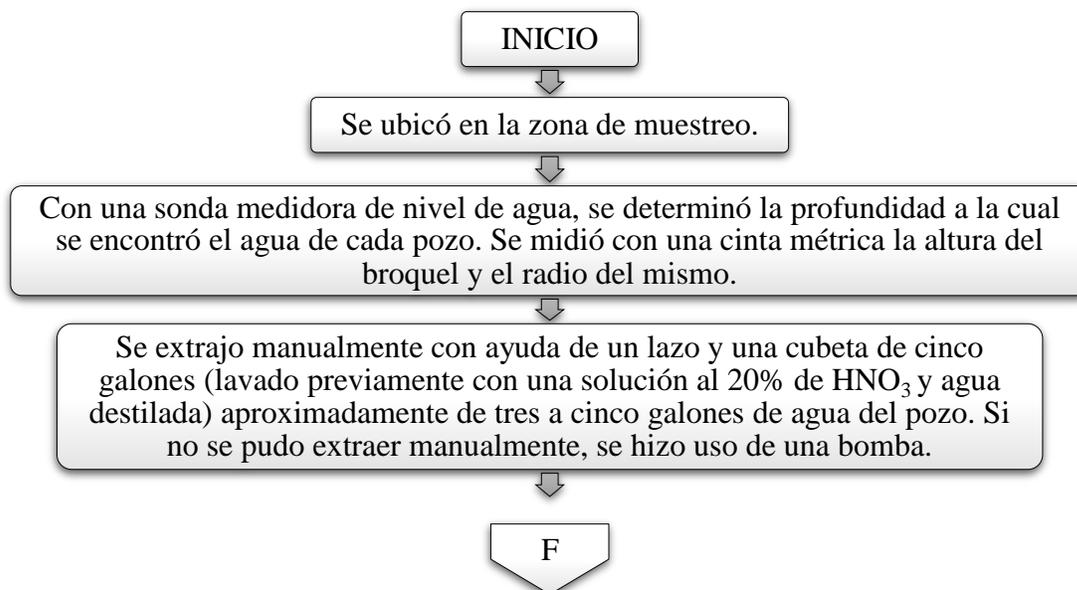




Figura A. 3. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia utilizando como base la Guía Operativa para la Recogida, Almacenamiento y Transporte de Muestras de Aguas Subterráneas Destinadas al Análisis Químico.

**ANEXO 4. Metodología de recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de cultivos).**

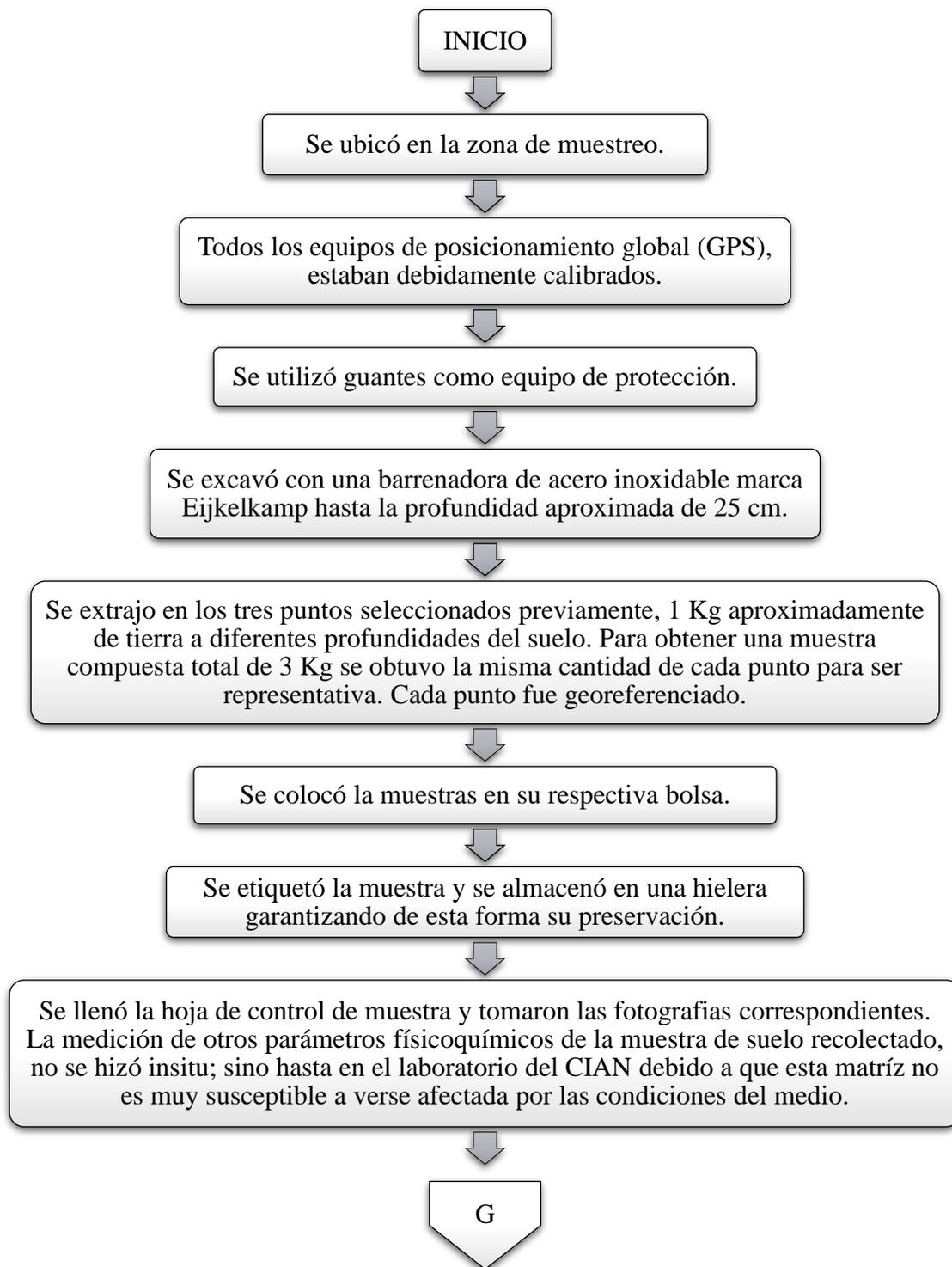
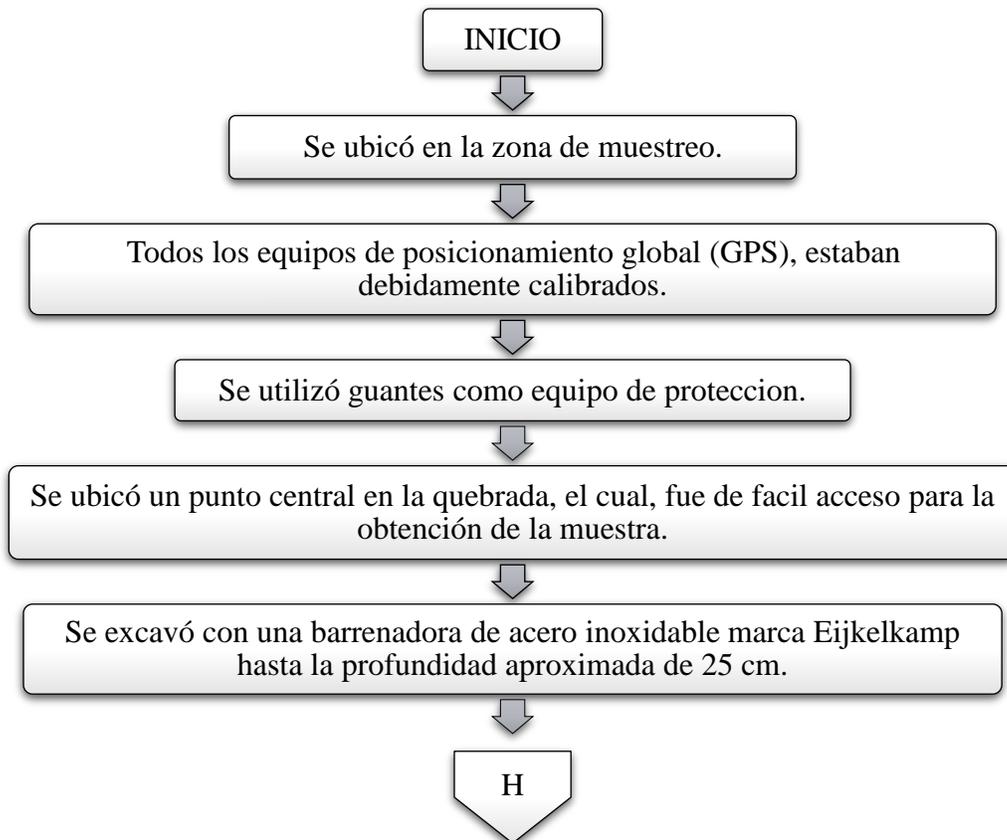




Figura A. 4. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de cultivo). Fuente: Elaboración propia utilizando como base la GUÍA PARA MUESTREO DE SUELOS en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, Perú.

**ANEXO 5. Metodología de recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de quebradas).**



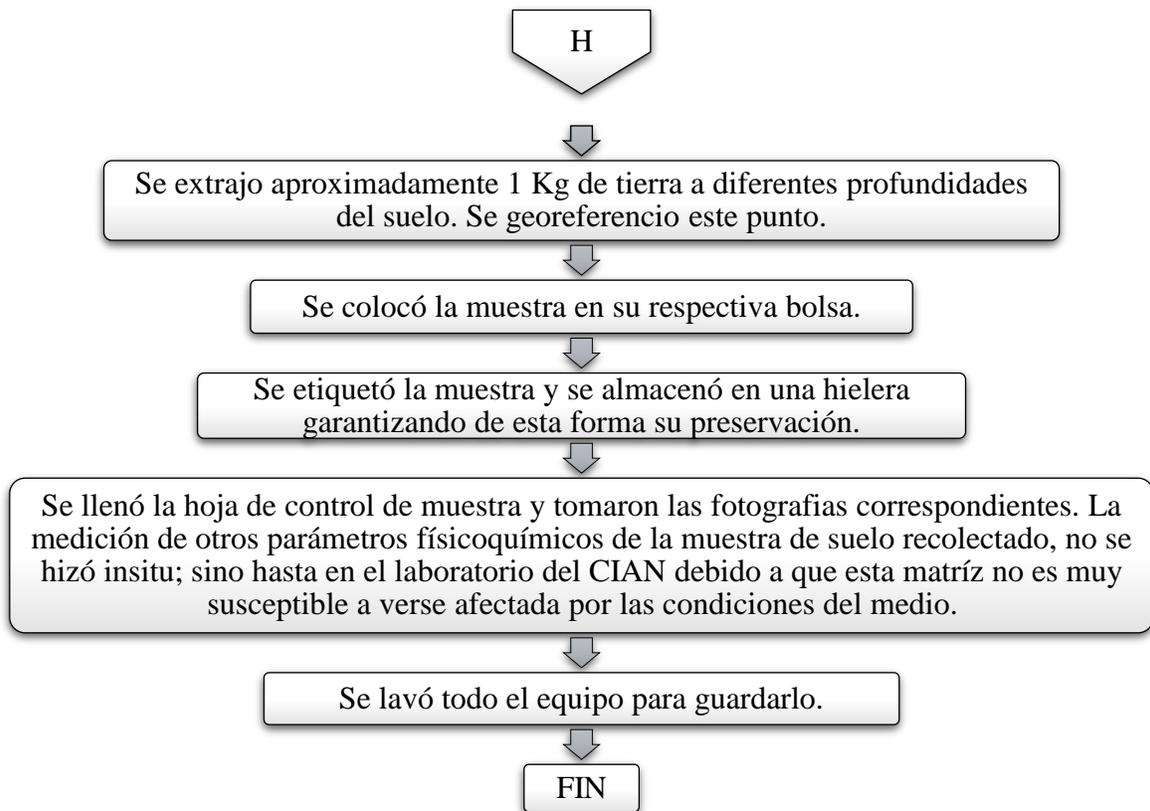
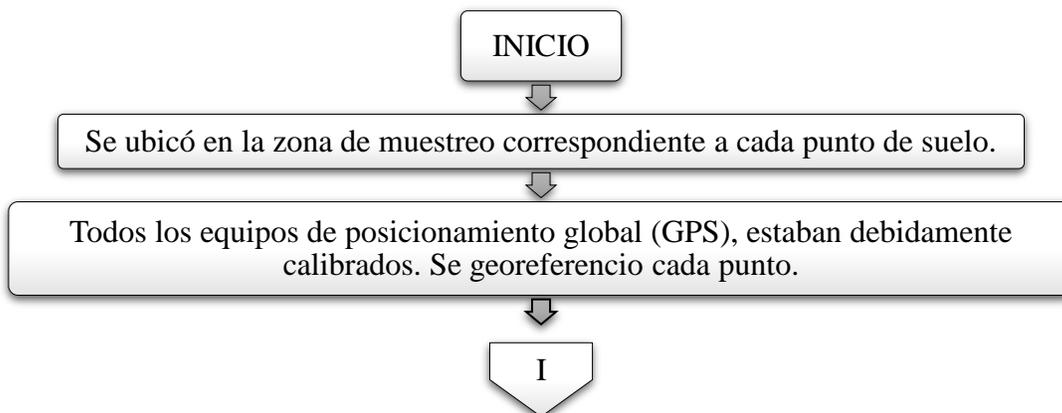


Figura A. 5. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de suelo (suelo de quebradas). Fuente: Elaboración propia utilizando como base la GUÍA PARA MUESTREO DE SUELOS en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, Perú.

**ANEXO 6. Metodología de recolección de muestras para la matriz de biomasa.**



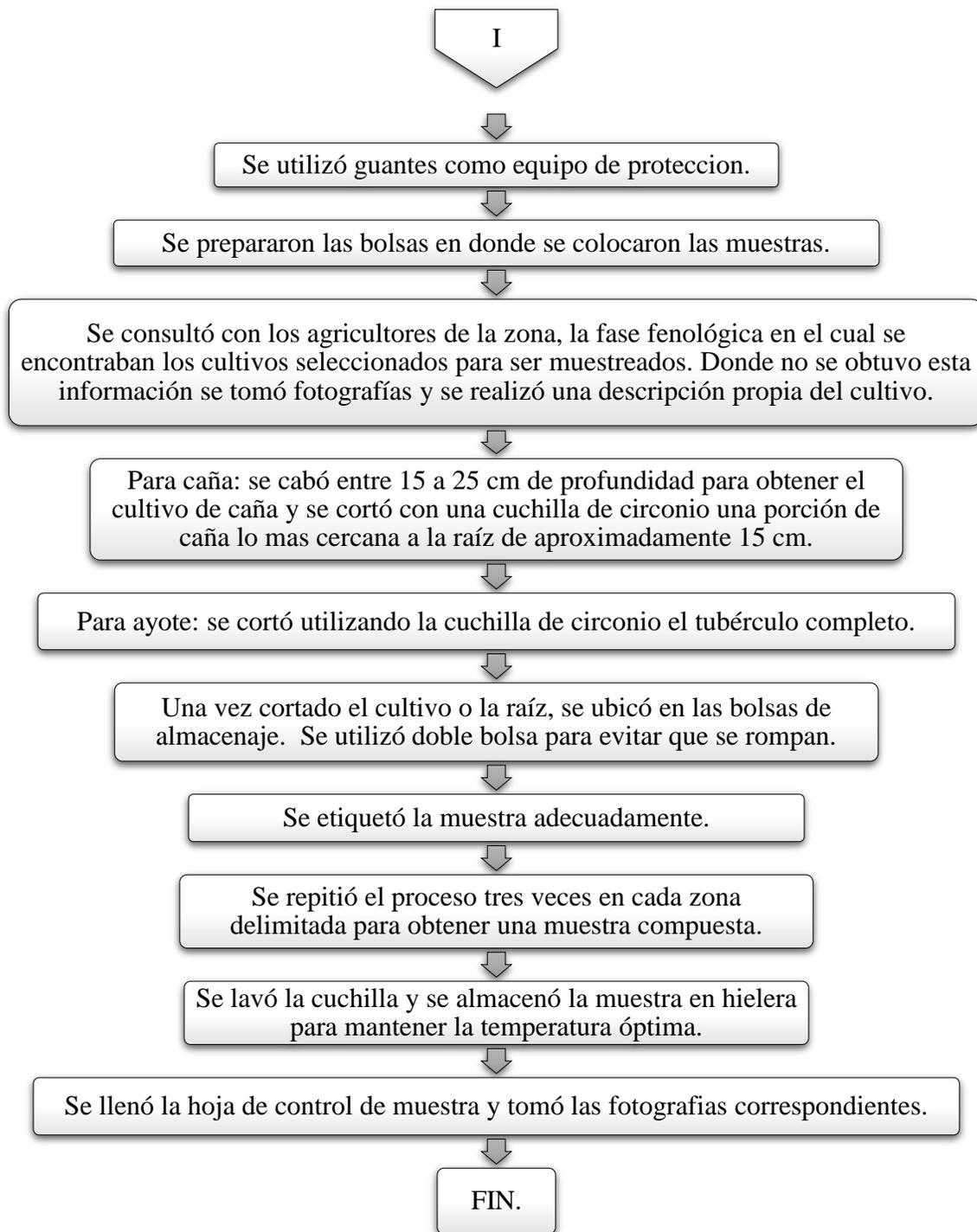


Figura A. 6. Flujograma de procedimiento realizado en la recolección de muestras para la matriz de biomasa. Fuente: Elaboración propia utilizando como base la Metodología EPA SOP N° ISSI-VB170-06 Muestreo de vegetales en jardín en residencias para determinación del riesgo basada en la exposición a metales.

## ANEXO 7. Descripción de las condiciones adecuadas para la preservación y envasado de las diferentes matrices.

Tabla A. 1. Condiciones de preservación y envasado para muestras de agua superficial, agua subterránea, sedimento, suelo y biomasa.

MUESTRA	PARÁMETRO ANALÍTICO	ENVASE	TAMAÑO	TRANSPORTE	PRESERVACIÓN	TIEMPO MÁXIMO DE ALMACENAMIENTO	CONDICIÓN DE ALMACENAMIENTO	REFERENCIA
AGUA SUPERFICIAL Y AGUA SUBTERRÁNEA	Metales: Cd, Ni, Pb y Zi	Polietileno, PTFE (teflón) o vidrio. Preferido PTFE	500 mL	Transporte bajo hielo	Acidificar a pH<2 con ácido nítrico	< 6 meses	-	EPA, 2009
SUELO Y SEDIMENTOS	Metales	PTFE(teflón) o plástico	-	Transporte bajo hielo	-	6 meses	Refrigerado a T<6°C	EPA, 2009
BIOMASA	Metales	Bolsa de plástico con cierre hermético	300 gramos	Transporte bajo hielo	-	-	Refrigerado a T<4°C	INECC-CCA (2010)

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 8. Descripción del contenido incluido para la etiqueta de los envases.**

The image shows a rectangular label template with a blue border. At the top center, the text *UES-FLA-EIQA* is written in a blue, italicized font, flanked by two dark blue rectangular blocks. Below this, the word **CÓDIGO:** is centered. The main body of the label contains several fields for data entry, each followed by a horizontal line for a response: **Fecha:** followed by three slashes and lines for day, month, and year; **Hora:** followed by a line; **Ubicación:** followed by a line; **Matriz:** followed by a line; **Cantidad de muestra:** followed by a line; **pH inicial:** followed by a line; **V. Ácido Agregado:** followed by a line; and **pH final:** followed by a line. A thick blue horizontal bar is located at the bottom of the label's inner frame.

Figura A. 7. Etiqueta para la identificación de muestras de diferentes matrices obtenidas en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador. Fuente: Elaboración propia.

### ANEXO 9. Hojas de muestreo.

Hoja de muestreo de agua superficial para el punto RPAS01.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUPERFICIAL							
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Agua				
<b>Nombre del punto</b>	RPAS01		<b>Transparencia del agua</b>	Fondo Visible	Algo Turbio	Poco Visible	No Visible
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza						
<b>Código de la muestra</b>	H2ORIO01		<b>Color del agua</b>	Verdoso claro			
<b>Fecha</b>	20/04/2016		<b>Olor del agua</b>	Olor fétido (olor parecido a muerto)			
<b>Hora de Inicio</b>	12:23 pm		<b>Temperatura del agua</b>	29.7 °C			
<b>Hora de Finalización</b>	12:31 pm		Conservación de la Muestra				
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
13°34.550' N	89°39.711' W	35 metros	<b>pH inicial</b>	7.05	<b>pH final</b>	2	
Fotografía			Descripción de la zona				
			La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 30 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 28 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 17 centímetros.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua superficial para el punto RPAS02.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUPERFICIAL							
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Agua				
<b>Nombre del punto</b>	RPAS02		<b>Transparencia del agua</b>	Fondo Visible	Algo Turbio	Poco Visible	No Visible
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas						
<b>Código de la muestra</b>	H2ORIO02		<b>Color del agua</b>	Café negroso			
<b>Fecha</b>	20/04/2016		<b>Olor del agua</b>	Olor a tierra			
<b>Hora de Inicio</b>	11:38 am		<b>Temperatura del agua</b>	28.8 °C			
<b>Hora de Finalización</b>	12:01 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>				
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
13°34.494' N	89°34.694' W	11 metros	<b>pH inicial</b>	6.62	<b>pH final</b>	2	
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>				
			<p>La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 12 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 24 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 42 centímetros.</p>				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua superficial para el punto RPAS03.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUPERFICIAL							
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Agua				
<b>Nombre del punto</b>	RPAS03		<b>Transparencia del agua</b>	Fondo Visible	Algo Turbio	Poco Visible	No Visible
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza						
<b>Código de la muestra</b>	H2ORIO03		<b>Color del agua</b>	Amarillo claro			
<b>Fecha</b>	20/04/2016		<b>Olor del agua</b>	Ninguno			
<b>Hora de Inicio</b>	1:56 pm		<b>Temperatura del agua</b>	28.7 °C			
<b>Hora de Finalización</b>	2:10 pm		Conservación de la Muestra				
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
13°34.290' N	89°40.006' W	17 metros	<b>pH inicial</b>	6.59	<b>pH final</b>	2	
Fotografía			Descripción de la zona				
			<p>La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 10 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 24 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 29 centímetros.</p>				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua superficial para el punto RPAS04.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUPERFICIAL							
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Agua				
<b>Nombre del punto</b>	RPAS04		<b>Transparencia del agua</b>	Fondo Visible	Algo Turbio	Poco Visible	No Visible
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas						
<b>Código de la muestra</b>	H2ORIO04		<b>Color del agua</b>	Café claro			
<b>Fecha</b>	25/05/2016		<b>Olor del agua</b>	Mal olor apreciable			
<b>Hora de Inicio</b>	10:00 am		<b>Temperatura del agua</b>	29.4 °C			
<b>Hora de Finalización</b>	10:50 am		Conservación de la Muestra				
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
13°33.780' N	89°40.265' W	34.9 metros	<b>pH inicial</b>	6.59	<b>pH final</b>	2	
Fotografía			Descripción de la zona				
			<p>En la zona había agua estancada, debido a que el nivel de la misma era muy por debajo de lo normal, por lo cual se sustrajo la muestra de un solo punto de muestreo, en este punto se observaba presencia de peces de pequeño tamaño.</p>				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de sedimento para el punto RPSE01.

<b>DATOS DE MUESTREO: SEDIMENTO</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características del Sedimento</b>		
<b>Nombre del punto</b>	RPSE01	<b>Color del sedimento</b>	Gris oscuro	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Olor del sedimento</b>	Olor fétido	
<b>Código de la muestra</b>	SEDRIO01	<b>Conservación de la Muestra</b>		
<b>Fecha</b>	20/04/2016	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
<b>Hora de Inicio</b>	12:32 pm	<b>Descripción de la zona</b>		
<b>Hora de Finalización</b>	12:40 pm	La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 30 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 28 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 17 centímetros.		
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.550' N	89°39.711' W			35 metros
<b>Fotografía</b>				
				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de sedimento para el punto RPSE02.

<b>DATOS DE MUESTREO: SEDIMENTO</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características del Sedimento</b>		
<b>Nombre del punto</b>	RPSE02	<b>Color del sedimento</b>	Negro	
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas	<b>Olor del sedimento</b>	Olor a podrido	
<b>Código de la muestra</b>	SEDRIO02	<b>Conservación de la Muestra</b>		
<b>Fecha</b>	20/04/2016	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
<b>Hora de Inicio</b>	12:03 pm	<b>Descripción de la zona</b>		
<b>Hora de Finalización</b>	12:17 pm	La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 12 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 24 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 42 centímetros.		
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.494' N	89°34.694' W			11 metros
<b>Fotografía</b>				
				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de sedimento para el punto RPSE03.

<b>DATOS DE MUESTREO: SEDIMENTO</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características del Sedimento</b>		
<b>Nombre del punto</b>	RPSE03	<b>Color del sedimento</b>	Café oscuro	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Olor del sedimento</b>	Ninguno	
<b>Código de la muestra</b>	SEDRIO03	<b>Conservación de la Muestra</b>		
<b>Fecha</b>	20/04/2016	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
<b>Hora de Inicio</b>	2:05 pm	<b>Descripción de la zona</b>		
<b>Hora de Finalización</b>	2:09 pm	La profundidad de los tres puntos de la sección transversal donde se tomaron las muestras fueron: para el punto a, se tomó a la profundidad de 10 centímetros, para el punto b, a la profundidad de 24 centímetros y para el punto c, a la profundidad de 29 centímetros.		
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.290' N	89°40.006' W			17 metros
<b>Fotografía</b>				
				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de sedimento para el punto RPSE04.

<b>DATOS DE MUESTREO: SEDIMENTO</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características del Sedimento</b>		
<b>Nombre del punto</b>	RPSE04	<b>Color del sedimento</b>	Café oscuro	
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas	<b>Olor del sedimento</b>	Leve olor fétido	
<b>Código de la muestra</b>	SEDRIO04	<b>Conservación de la Muestra</b>		
<b>Fecha</b>	25/05/2016	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
<b>Hora de Inicio</b>	1:00 pm	<b>Descripción de la zona</b>		
<b>Hora de Finalización</b>	1:20 pm	En la zona había agua estancada, debido a que el nivel de la misma estaba muy por debajo de lo normal, por lo cual se sustrajo la muestra de un solo punto de muestreo, en este punto se observaba presencia de peces de pequeño tamaño.		
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°33.780' N	89°40.265' W			34.9 metros
<b>Fotografía</b>				
				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO02.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
<b>Nombre del punto</b>	POZO02		<b>Color del agua</b>	Cristalina		<b>Temperatura del agua</b> 28.9 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza		<b>Olor del agua</b>	Inodoro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ01		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	-----
<b>Fecha</b>	20/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>	-----	<b>Altura brocal</b>
<b>Hora de Inicio</b>	11:09 am		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	11:28 am					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.696' N	89°39.474' W	15 metros	<b>pH inicial</b>	6.33	<b>pH final</b>	2
Fotografía			Descripción de la zona			
			Pozo sellado, por lo cual no se obtuvieron las mediciones de nivel freático.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO04.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
<b>Nombre del punto</b>	POZO04		<b>Color del agua</b>	Cristalina		<b>Temperatura del agua</b> 29 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza		<b>Olor del agua</b>	Inodoro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ02		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	-----
<b>Fecha</b>	20/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>		-----
<b>Hora de Inicio</b>	1:35 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	1:45 pm					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.466' N	89°40.046' W	25 metros	<b>pH inicial</b>	6.07	<b>pH final</b>	2
Fotografía			Descripción de la zona			
			<p>Pozo sellado, por experiencia de los lugareños, la profundidad desde el broquel al agua es de 6 m aproximadamente.</p>			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO05.

<b>DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA</b>						
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>			<b>Características del Nacimiento o Pozo</b>			
<b>Nombre del punto</b>	POZO05		<b>Color del agua</b>	Incoloro		<b>Temperatura del agua</b> 29.9 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza		<b>Olor del agua</b>	Inodoro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ03		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	73 centímetros
<b>Fecha</b>	20/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	2:44 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	2:50 pm					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.264' N	89°40.253' W	12 metros	<b>pH inicial</b>	5.98	<b>pH final</b>	2
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>			
			Terreno aledaño a una plantación de árboles frutales.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO07.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
Nombre del punto	POZO07		Color del agua	Incoloro		Temperatura del agua 30.5 °C
Muestreador	Br. Rodrigo Rivas		Olor del agua	Incoloro		
Código de la muestra	H2OPOZ04		Profundidad del pozo	-----	Diámetro del pozo	-----
Fecha	27/04/2016			-----		Altura brocal
Hora de Inicio	9:30 am		Profundidad del agua	-----	-----	
Hora de Finalización	9:40 am		Conservación de la Muestra			
Coordenadas		Altura	HNO <sub>3</sub> agregado	1.5 mL	Temperatura de almacenamiento	-----
13°34.003' N	89°40.420' W	14 metros	pH inicial	5.92	pH final	2
Fotografía			Descripción de la zona			
			Pozo cerrado se extrae agua con uso de manivela mecánica, pozo comunal de la zona.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO09.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
<b>Nombre del punto</b>	POZO09		<b>Color del agua</b>	Cristalina		<b>Temperatura del agua</b> 28.8 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Kathya Villalobos		<b>Olor del agua</b>	Inodoro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ05		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	1.05 metros
<b>Fecha</b>	20/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	10:28 am		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	10:45 am					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.811' N	89°39.821' W	20 metros	<b>pH inicial</b>	5.68	<b>pH final</b>	2
Fotografía			Descripción de la zona			
			El pozo es utilizado por medio de bomba mecánica.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO10.

<b>DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA</b>						
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>			<b>Características del Nacimiento o Pozo</b>			
<b>Nombre del punto</b>	POZO10		<b>Color del agua</b>	Incoloro		<b>Temperatura del agua</b> 28.9 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza		<b>Olor del agua</b>	Incoloro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ06		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	80 centímetros
<b>Fecha</b>	20/04/2016					
<b>Hora de Inicio</b>	2:00 pm		<b>Profundidad del agua</b>	6.37 metros	<b>Altura brocal</b>	1.15 metros
<b>Hora de Finalización</b>	2:20 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.257' N	89°40.241' W	19 metros	<b>pH inicial</b>	6.09	<b>pH final</b>	2
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>			
						

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO11.

<b>DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA</b>						
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>			<b>Características del Nacimiento o Pozo</b>			
<b>Nombre del punto</b>	POZO11		<b>Color del agua</b>	Incoloro		<b>Temperatura del agua</b> 28.2 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Kathya Villalobos		<b>Olor del agua</b>	Incoloro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ11		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	90 centímetros
<b>Fecha</b>	20/04/2016					
<b>Hora de Inicio</b>	2:35 pm		<b>Profundidad del agua</b>	4.99 metros	<b>Altura brocal</b>	1.03 metros
<b>Hora de Finalización</b>	2:40 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.242' N	89°40.241' W	19 metros	<b>pH inicial</b>	5.90	<b>pH final</b>	2
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>			
						

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO12.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
<b>Nombre del punto</b>	POZO12		<b>Color del agua</b>	Inodoro		<b>Temperatura del agua</b> 29.3 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas		<b>Olor del agua</b>	Incoloro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ08		<b>Profundidad del pozo</b> -----	<b>Diámetro del pozo</b>	79 centímetros	
<b>Fecha</b>	27/04/2016				<b>Profundidad del agua</b> -----	<b>Altura brocal</b>
<b>Hora de Inicio</b>	10:00 am		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	10:15 am					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°34.257' N	89°40.148' W	16 metros	<b>pH inicial</b>	6.01	<b>pH final</b>	2
Fotografía			Descripción de la zona			
						

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO13.

<b>DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA</b>						
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>			<b>Características del Nacimiento o Pozo</b>			
<b>Nombre del punto</b>	POZO13		<b>Color del agua</b>	Inodoro		<b>Temperatura del agua</b> 29 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas		<b>Olor del agua</b>	Incoloro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ09		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	-----
<b>Fecha</b>	27/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>	-----	<b>Altura brocal</b>
<b>Hora de Inicio</b>	10:40 am		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	10:52 am		<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>pH inicial</b>	6.05	<b>pH final</b>	2
13°34.201' N	89°39.977' W	18 metros				
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>			
			Pozo cerrado, se extrae agua a través de bomba mecánica.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO15.

<b>DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA</b>						
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>			<b>Características del Nacimiento o Pozo</b>			
<b>Nombre del punto</b>	POZO15		<b>Color del agua</b>	Inodoro		<b>Temperatura del agua</b> 29.6 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas		<b>Olor del agua</b>	Incoloro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ10		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	-----
<b>Fecha</b>	27/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>	-----	<b>Altura brocal</b>
<b>Hora de Inicio</b>	11:05 am		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	11:18 am		<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
<b>Coordenadas</b>	<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----	
13°34.136' N	89°40.003' W	13 metros	<b>pH inicial</b>	6.05	<b>pH final</b>	2
<b>Fotografía</b>			<b>Descripción de la zona</b>			
			Pozo cerrado, se extrae agua con uso de manivela mecanizada, pozo comunal de la zona.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de agua subterránea para el punto POZO16.

DATOS DE MUESTREO: AGUA SUBTERRANEA						
Datos de Identificación de Muestreo			Características del Nacimiento o Pozo			
<b>Nombre del punto</b>	POZO16		<b>Color del agua</b>	Incoloro		<b>Temperatura del agua</b> 29.6 °C
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas		<b>Olor del agua</b>	Inodoro		
<b>Código de la muestra</b>	H2OPOZ11		<b>Profundidad del pozo</b>	-----	<b>Diámetro del pozo</b>	-----
<b>Fecha</b>	27/04/2016			<b>Profundidad del agua</b>	-----	<b>Altura brocal</b>
<b>Hora de Inicio</b>	2:30 pm		<b>Conservación de la Muestra</b>			
<b>Hora de Finalización</b>	2:40 pm					
<b>Coordenadas</b>		<b>Altura</b>	<b>HNO<sub>3</sub> agregado</b>	1.5 mL	<b>Temperatura de almacenamiento</b>	-----
13°33.830' N	89°40.508' W	16 metros	<b>pH inicial</b>	6.10	<b>pH final</b>	2
Fotografía			Descripción de la zona			
			Pozo cerrado, se extrae agua con uso de manivela mecánica, pozo comunal de la zona.			

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL04.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA				
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa		
Nombre del punto	SUEL04	Nombre común de la biomasa	-----	
Muestreador	Br. Rodrigo Rivas	Punto de biomasa relacionado	-----	
Código de la muestra	SUEL09	Punto de suelo relacionado	SUEL04	
Fecha	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
Hora de Inicio	2:10 pm			
Hora de Finalización	2:30 pm			
Profundidad	0-24 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.373' N	89°40.189' W			17 metros
-----	-----			-----
-----	-----			-----
<b>Descripción de la zona</b>				
Quebrada junto al relleno sanitario, no posee biomasa.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL05.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA				
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa		
Nombre del punto	SUEL05	Nombre común de la biomasa	-----	
Muestreador	Br. Rodrigo Rivas	Punto de biomasa relacionado	-----	
Código de la muestra	SUEL10	Punto de suelo relacionado	SUEL05	
Fecha	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
Hora de Inicio	2:40 pm			
Hora de Finalización	3:00 pm			
Profundidad	0-30 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.228' N	89°40.275' W			14 metros
-----	-----			-----
-----	-----			-----
<b>Descripción de la zona</b>				
Quebrada junto al relleno sanitario, no posee biomasa.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL06/CULT04.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA				
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa		
<b>Nombre del punto</b>	SUEL06/CULT04	<b>Nombre común de la biomasa</b>	-----	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT04	
<b>Código de la muestra</b>	SUEL01	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL06	
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	10:05 am			
<b>Hora de Finalización</b>	10:35 am			
<b>Profundidad</b>	0-25 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.150' N	89°40.016' W			13 metros
-----	-----			-----
-----	-----	-----		
<b>Descripción de la zona</b>				
En este punto no se encontró caña sino pastos, por lo cual no se obtuvo muestra de biomasa.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL06/CULT04.

<b>DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características de la biomasa</b>		
<b>Nombre del punto</b>	SUEL06/CULT04	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Caña	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT04	
<b>Código de la muestra</b>	CAÑA01/SUEL02	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL06	
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	11:05 am			
<b>Hora de Finalización</b>	12:05 pm			
<b>Profundidad</b>	0-25, 0-20 y 0-25 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.150' N	89°40.016' W			13 metros
13°34.163' N	89°40.028' W			17 metros
13°34.134' N	89°40.062' W			16 metros
<b>Descripción de la zona</b>				
Se obtuvo muestra compuesta de suelo y caña, para las cuales se especifican las coordenadas.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL06/CULT04.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA					
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa			
<b>Nombre del punto</b>	SUEL06/CULT04	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Caña		
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT04		
<b>Código de la muestra</b>	CAÑA02/SUEL03	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL06		
<b>Fecha</b>	18/05/2016				
<b>Hora de Inicio</b>	12:30 pm				
<b>Hora de Finalización</b>	1:05 pm				
<b>Profundidad</b>	0-26, 0-25 y 0-27 centímetros				
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>	
13°34.079' N	89°40.083' W			11 metros	
13°34.101' N	89°40.102' W			10 metros	
13°34.143' N	89°40.190' W	16 metros			
<b>Descripción de la zona</b>					
Se obtuvo muestra compuesta de suelo y caña, para las cuales se especifican las coordenadas.					

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL11/CULT09.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA				
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa		
<b>Nombre del punto</b>	SUEL11/CULT09	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Ayote	
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT09	
<b>Código de la muestra</b>	AYOT03/SUEL08	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL11	
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<div style="text-align: center;"><b>Fotografía</b></div> 		
<b>Hora de Inicio</b>	1:00 pm			
<b>Hora de Finalización</b>	1:30 pm			
<b>Profundidad</b>	0-25 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.254' N	89°40.253' W			9 metros
-----	-----			-----
-----	-----	-----		
<b>Descripción de la zona</b>				
Este punto de suelo se cambió del punto de suelo 11 como lo señala la nomenclatura anterior y el cultivo asociado era cultivo 09.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL09/CULT07.

<b>DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características de la biomasa</b>		
<b>Nombre del punto</b>	SUEL09/CULT07	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Caña	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT07	
<b>Código de la muestra</b>	CAÑA03/SUEL04	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL09	
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	1:30 pm			
<b>Hora de Finalización</b>	2:30 pm			
<b>Profundidad</b>	0-27, 0-24 y 0-25 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.383' N	89°40.153' W			13 metros
13°34.380' N	89°40.077' W			12 metros
13°34.378' N	89°39.998' W			10 metros
<b>Descripción de la zona</b>				
Se obtuvo muestra compuesta de suelo y caña, para las cuales se especifican las coordenadas.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL09/CULT07.

<b>DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA</b>				
<b>Datos de Identificación de Muestreo</b>		<b>Características de la biomasa</b>		
<b>Nombre del punto</b>	SUEL09/CULT07	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Caña	
<b>Muestreador</b>	Br. Luisa Mendoza	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT07	
<b>Código de la muestra</b>	CAÑA04/SUEL05	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL09	
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<b>Fotografía</b>		
<b>Hora de Inicio</b>	3:00 pm			
<b>Hora de Finalización</b>	3:30 pm			
<b>Profundidad</b>	0-20, 0-28 y 0-25 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.477' N	89°40.028' W			16 metros
13°34.515' N	89°39.948' W			10 metros
13°34.483' N	89°39.850' W			18 metros
<b>Descripción de la zona</b>				
Se obtuvo muestra compuesta de suelo y caña, para las cuales se especifican las coordenadas.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL12/CULT10.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA				
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa		
Nombre del punto	SUEL12/CULT10	Nombre común de la biomasa	Ayote y Caña	
Muestreador	Br. Rodrigo Rivas	Punto de biomasa relacionado	CULT10	
Código de la muestra	CAÑA05/AYOT01/SUEL06	Punto de suelo relacionado	SUEL12	
Fecha	18/05/2016	<div style="text-align: center;"><b>Fotografía</b></div> 		
Hora de Inicio	10:40 am			
Hora de Finalización	11:30 am			
Profundidad	0-31 centímetros			
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>
13°34.259' N	89°40.013' W			18 metros
-----	-----	-----		
-----	-----	-----		
<b>Descripción de la zona</b>				
Se obtuvo muestra de suelo, caña y ayote.				

Fuente: Elaboración propia.

Hoja de muestreo de suelo/biomasa para el punto SUEL13/CULT11.

DATOS DE MUESTREO: SUELO/BIOMASA					
Datos de Identificación de Muestreo		Características de la biomasa			
<b>Nombre del punto</b>	SUEL13/CULT11	<b>Nombre común de la biomasa</b>	Ayote		
<b>Muestreador</b>	Br. Rodrigo Rivas	<b>Punto de biomasa relacionado</b>	CULT11		
<b>Código de la muestra</b>	AYOT02/SUEL07	<b>Punto de suelo relacionado</b>	SUEL13		
<b>Fecha</b>	18/05/2016	<div style="text-align: center;"><b>Fotografía</b></div> 			
<b>Hora de Inicio</b>	11:47 am				
<b>Hora de Finalización</b>	12:30 pm				
<b>Profundidad</b>	0-26 centímetros				
<b>Coordenadas</b>				<b>Altura</b>	
13°33.851' N	89°40.155' W			16 metros	
-----	-----			-----	
-----	-----	-----			
<b>Descripción de la zona</b>					
Se obtuvieron muestras de suelo y ayote.					

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 10. Procedimiento seguido para el correcto lavado de cristalería en el laboratorio.**

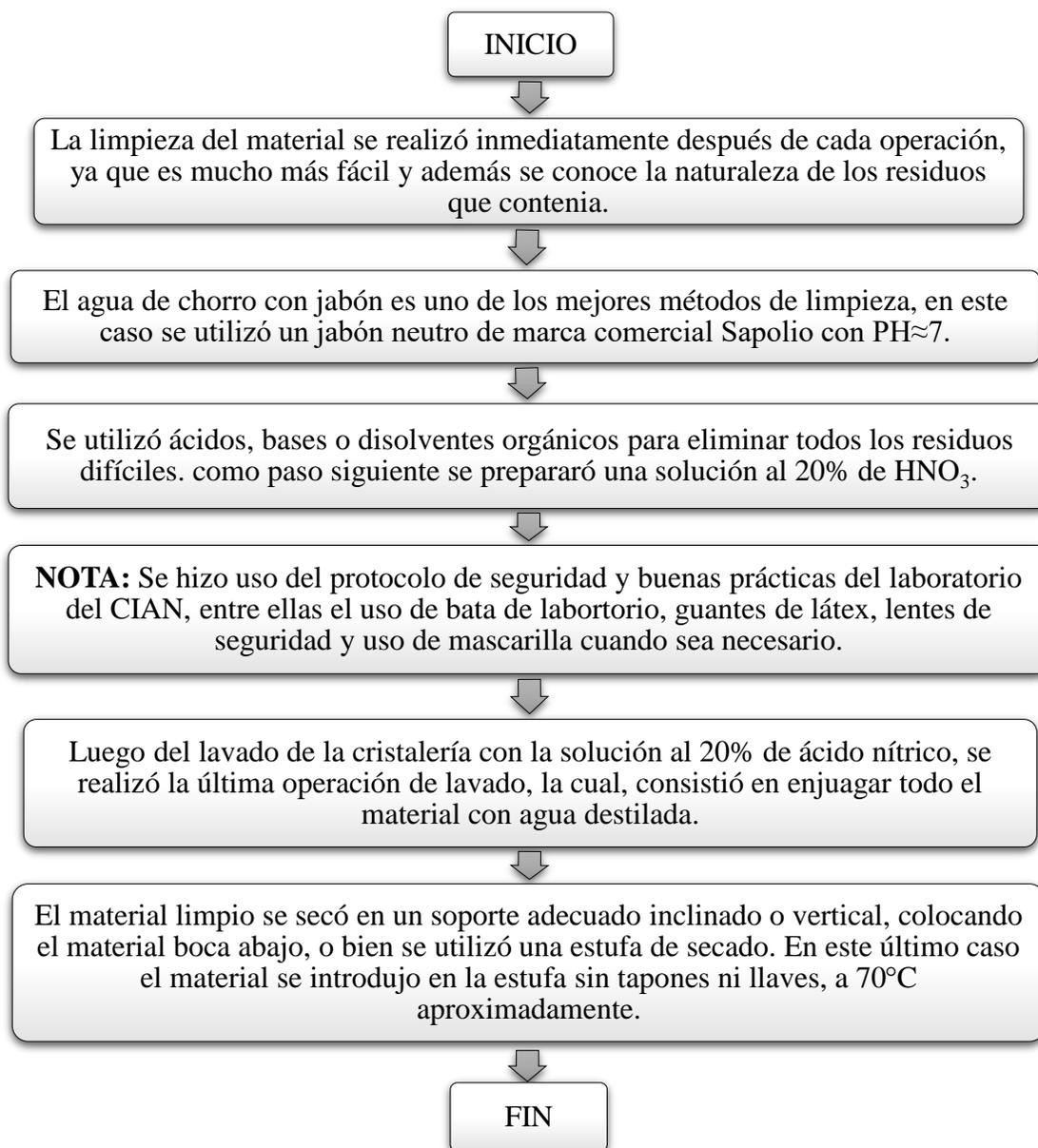


Figura A. 8. Procedimiento de lavado de cristalería en el laboratorio. Fuente: Universidad de Barcelona (2012). *Operaciones Básicas en el Laboratorio de Química. Metodología. Limpieza del Material de Laboratorio.*

## **ANEXO 11. Materiales, equipo, reactivos y procedimiento necesario para la digestión de matrices de agua superficial y agua subterránea.**

### **I. Materiales y Equipo.**

- a. Beakers Griffin de diferentes tamaños o equivalente.
- b. Cilindro graduado o equivalente.
- c. Cualitativos de papel de filtro y filtros de embudos.
- d. Hot plate eléctrico o equivalente, ajustable y capaz de mantener una temperatura de 90 a 95 C.
- e. Vidrios de reloj o equivalente.

### **II. Reactivos.**

Productos químicos de grado reactivo se utilizaron en todas las pruebas.

- a. Reactivo agua destilada: el agua reactiva debe estar libre de interferencia. Toda la referencia al agua en el método se refiere al reactivo agua a menos que se especifique lo contrario.
- b. El ácido nítrico (concentrado),  $\text{HNO}_3$ : debe ser analizada para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.
- c. El ácido clorhídrico (concentrado),  $\text{HCl}$ : debe ser analizado para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.

### III. Procedimiento.

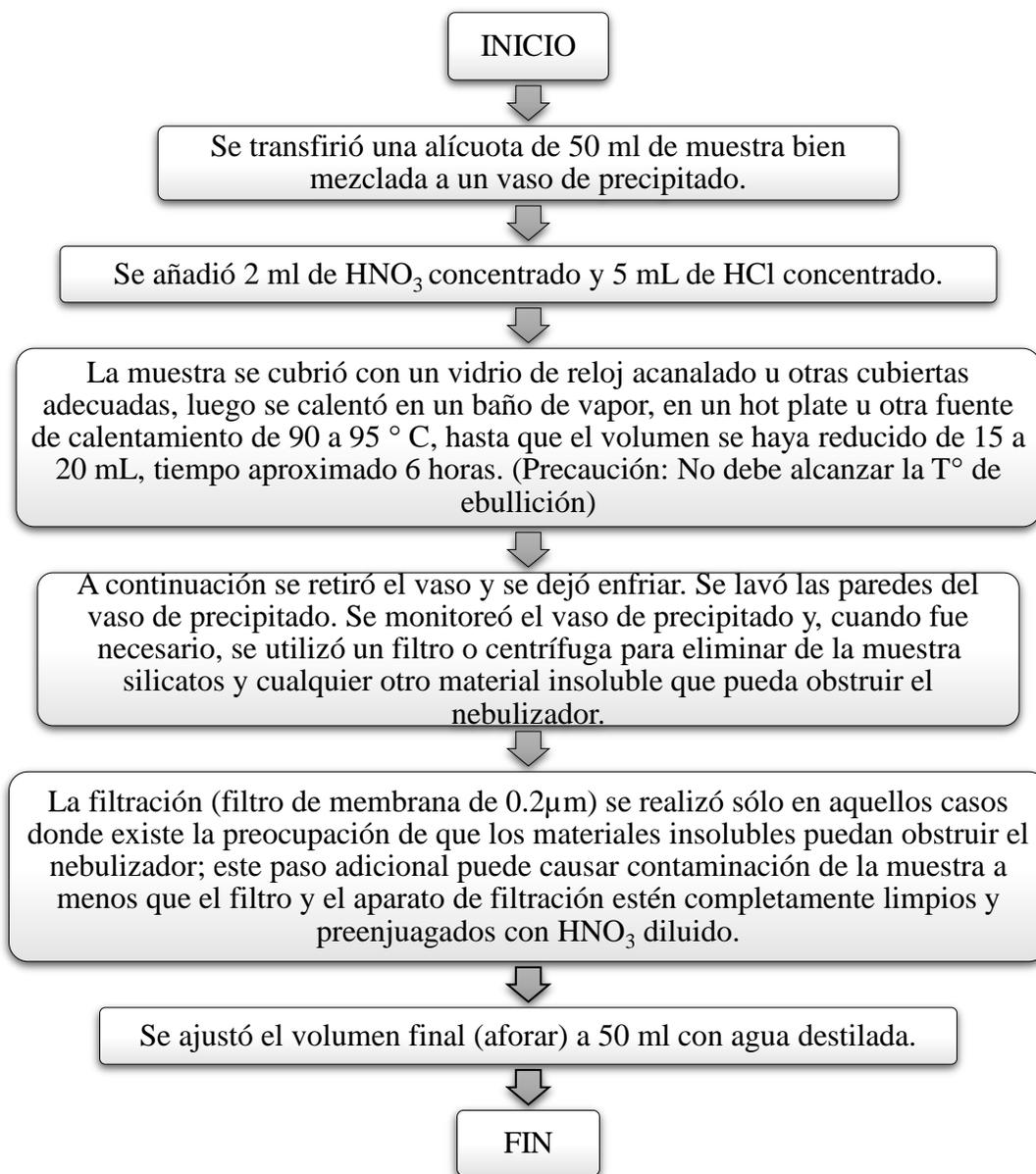


Figura A. 9. Procedimiento de digestión de matrices de agua superficial y agua subterránea. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1992). *Método 3005A. Digestión acida de aguas para el análisis de contenido total de metales recuperables o disueltos por espectroscopia ICP o FLAA.*

## **ANEXO 12. Materiales, equipo, reactivos y procedimiento necesario para la digestión de matrices de suelo y sedimento.**

### **I. Materiales y Equipo.**

- a. Balanza analítica capaz de pesar con precisión de 0,01 g.
- b. Beacker Cónicos de precipitados Phillips de 250 mL o equivalente.
- c. Centrífuga y centrifugar los tubos.
- d. Cilindro graduado o equivalente.
- e. Embudo de vidrio o equivalente.
- f. Hornos de secado que puede ser mantenida a 30 C.
- g. Hot Plate o equivalente, ajustable y capaz de mantener una temperatura de 90 a 95 C.
- h. Papel de filtro Whatman No. 41 o equivalente.
- i. Termómetro que cubre rango de 0 a 200 C.
- j. Vidrios de reloj de crucería o equivalente.

### **II. Reactivos.**

Productos químicos de grado reactivo se utilizaron en todas las pruebas.

- a. Reactivo agua destilada: el agua reactiva debe estar libre de interferencia. Toda la referencia al agua en el método se refiere al reactivo agua a menos que se especifique lo contrario.
- b. El ácido nítrico (concentrado),  $\text{HNO}_3$ : debe ser analizada para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.
- c. El ácido clorhídrico (concentrado),  $\text{HCl}$ : debe ser analizado para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.
- d. El peróxido de hidrógeno (30%):  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Oxidante debe ser analizado para determinar el nivel de impurezas.

### III. Procedimiento.

A veces es necesario acondicionar o pre tratar la muestra previa a su digestión, para lo cual se detalla el proceso seguido en el laboratorio para las muestras de sedimento y suelo.

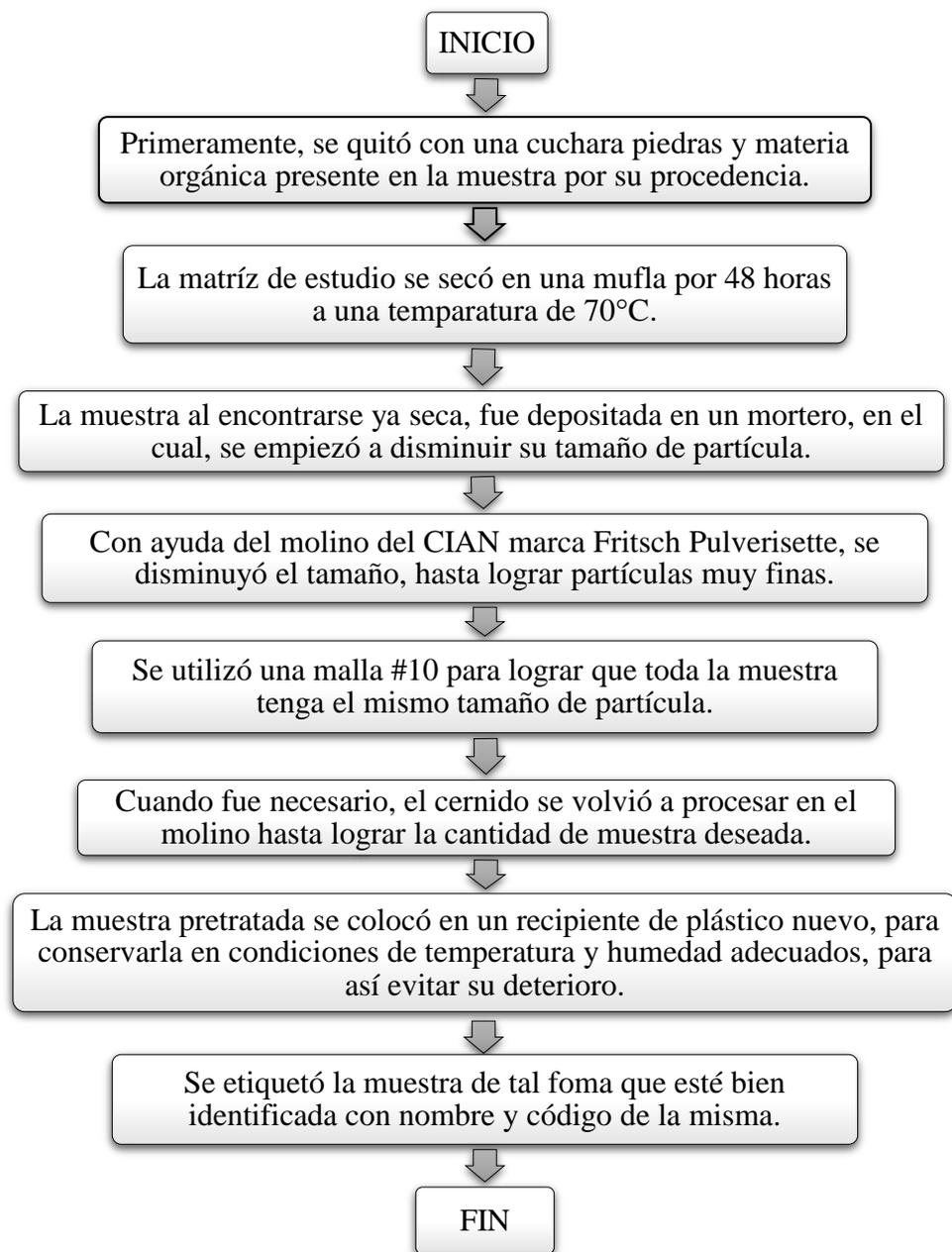
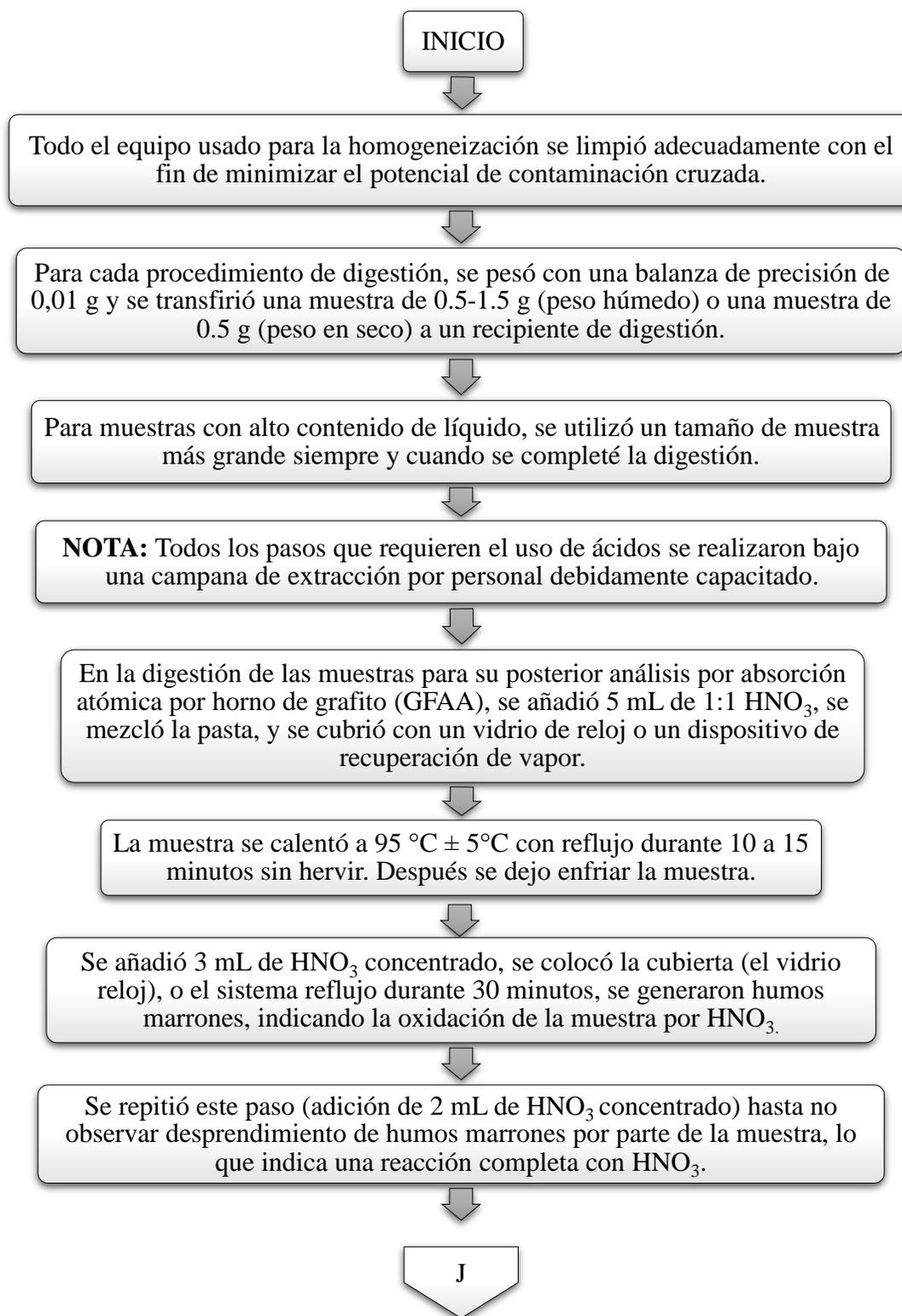


Figura A. 10. Procedimiento de previo a la digestión de matrices de suelo y sedimento. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*



J

Se usó un vidrio de reloj o un sistema de recuperación de vapor, permitiendo que la solución se evapore hasta que se obtenga aproximadamente un volumen de 5 mL. Se calentó a  $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  sin alcanzar la temperatura de ebullición durante dos horas.

Se mantuvo la cubierta de la solución por encima del fondo del recipiente (beaker) en todo momento.

Después que los pasos anteriores se han completado y la muestra se ha enfriado, se añadió 1 mL de agua y 2 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%. El recipiente se cubrió con un vidrio de reloj o un dispositivo de recuperación de vapor.

El frasco se devolvió a la fuente de calor (Hot plate) para iniciar la reacción de peróxido. Se tuvo cuidado para asegurar que las pérdidas no se produjeran debido a la efervescencia excesivamente vigorosa.

Se calentó hasta que disminuyó la efervescencia y después se dejó enfriar el recipiente.

Se continuó añadiendo  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30% en alícuotas de 1 mL (gota a gota), con calentamiento hasta que fue mínima la efervescencia, o hasta que no se notó cambio en el aspecto general de la muestra.

**NOTA:** No se agregó más de un total de 6 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%.

La muestra se cubrió con un vidrio de reloj o un dispositivo de recuperación de vapor y se continuó el calentamiento del digestado ácido-peróxido hasta que el volumen se redujo aproximadamente a 5 mL.

En el paso anterior, se calentó la muestra en el Hot-plate a  $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  sin hervir durante dos horas. Se mantuvo la cubierta de la solución por encima del fondo del recipiente en todo momento.

K

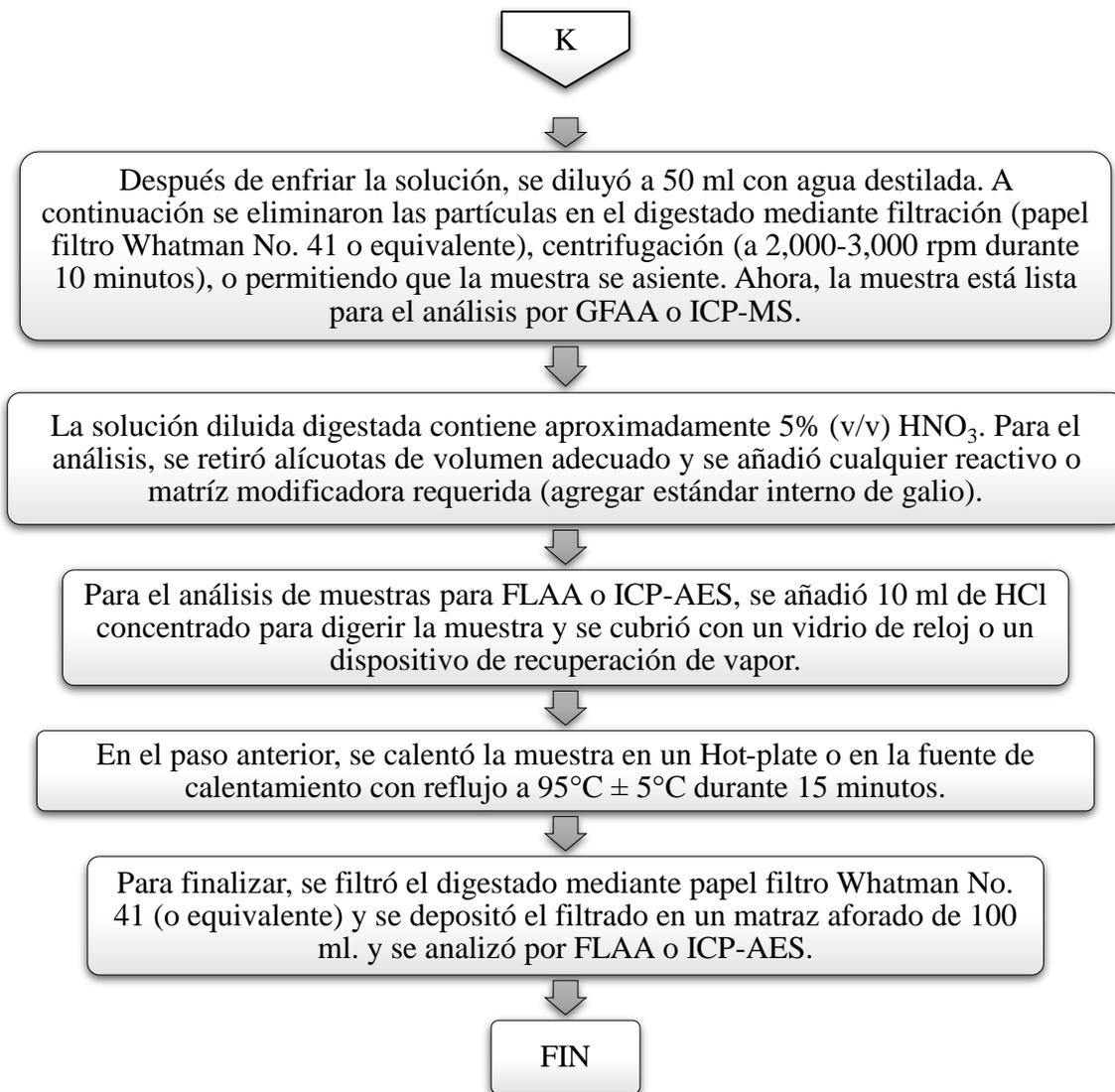


Figura A. 11. Procedimiento de digestión de matrices de suelo y sedimento. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*

### ANEXO 13. Materiales, equipo, reactivos y procedimiento necesario para la digestión de matriz de biomasa.

#### I. Tratamiento previo a la digestión.

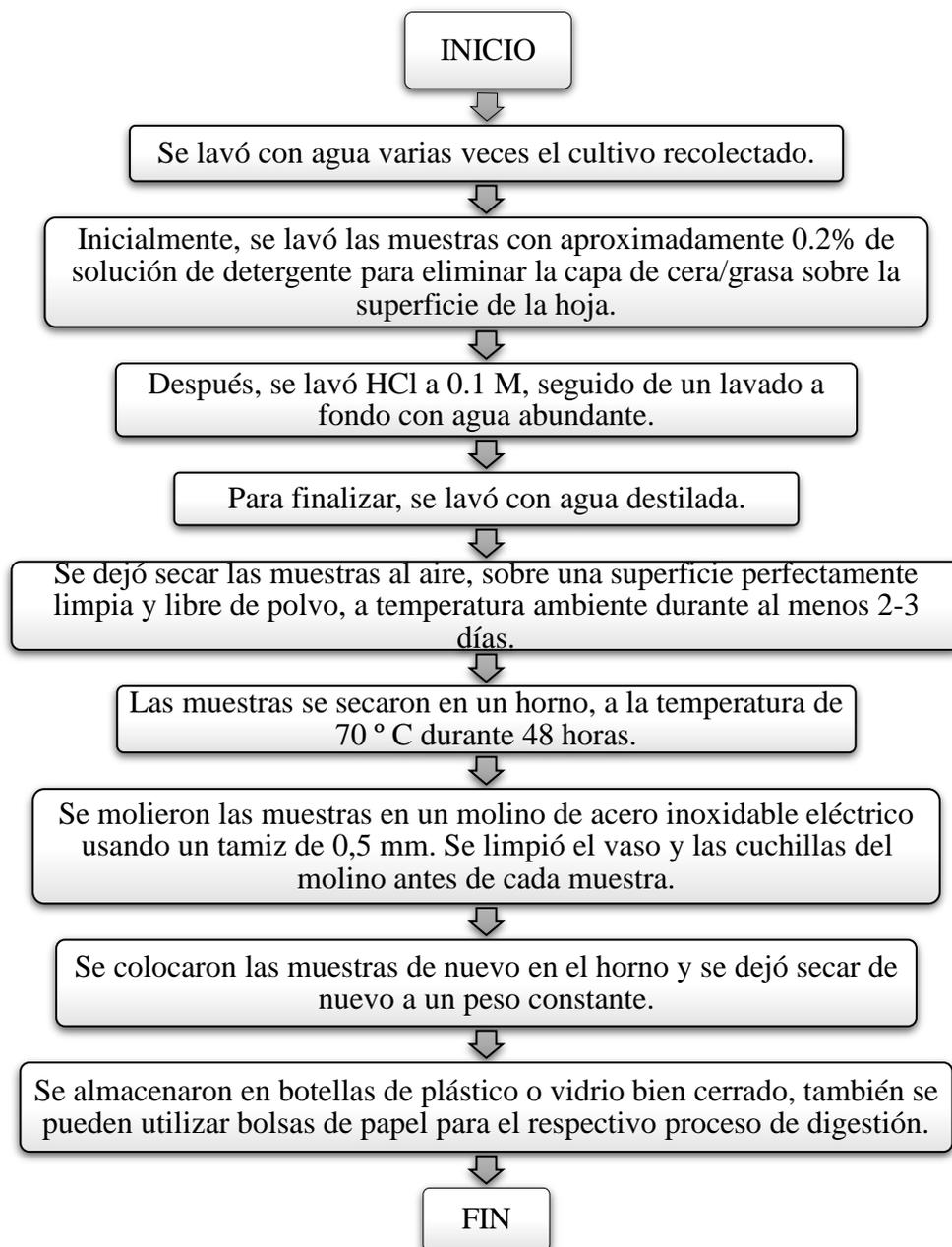


Figura A. 12. Procedimiento de previo a la digestión de matriz de biomasa. Fuente: Motsara, M. R. y Roy, N. R. (2008). *Guía de laboratorio para el análisis de nutrientes*. Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas. Roma, Italia.

## II. Reactivos.

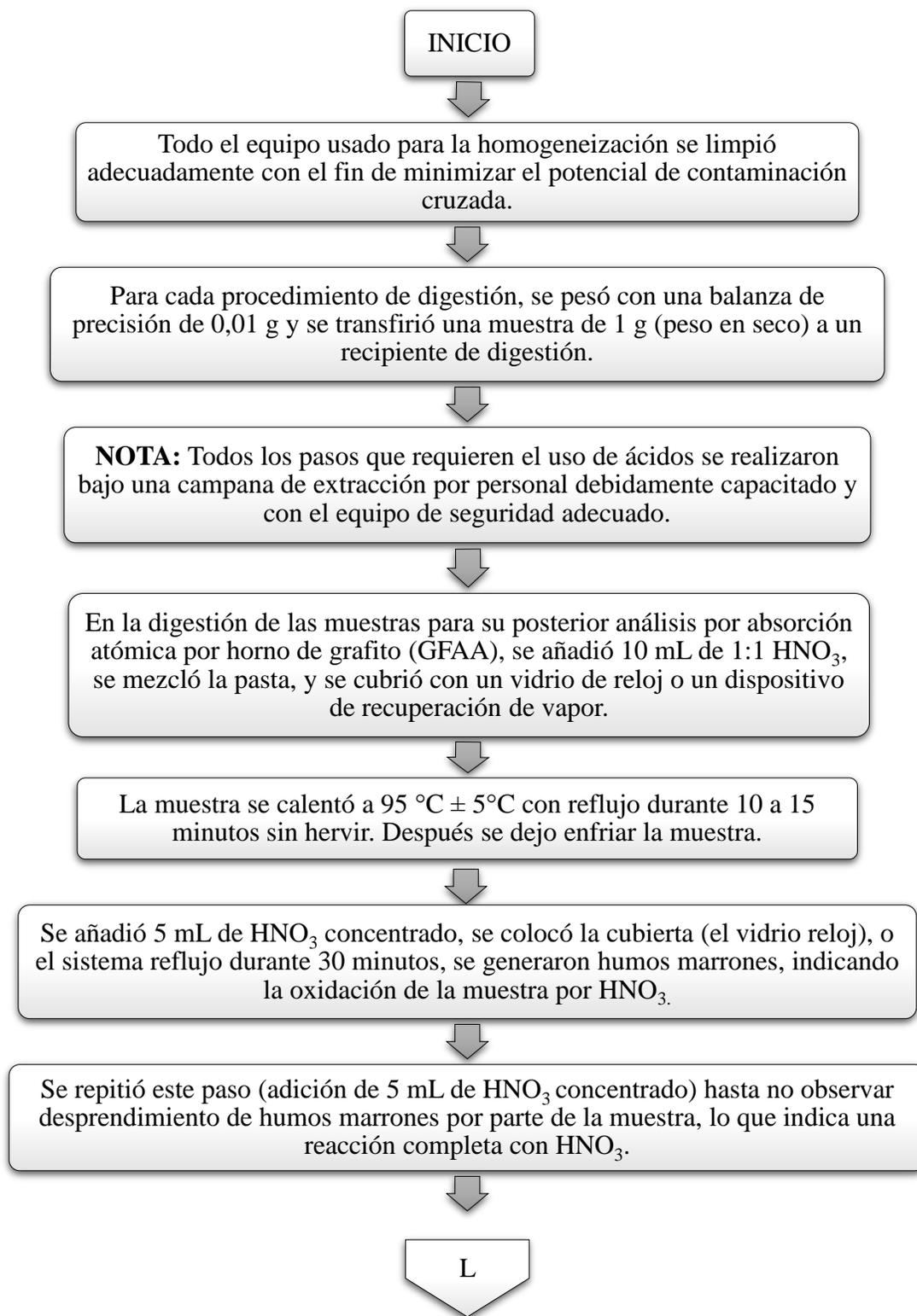
Productos químicos de grado reactivo se utilizaron en todas las pruebas.

- a. Reactivo agua destilada: el agua reactiva debe estar libre de interferencia. Toda la referencia al agua en el método se refiere al reactivo agua a menos que se especifique lo contrario.
- b. El ácido nítrico (concentrado),  $\text{HNO}_3$ : debe ser analizada para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.
- c. El ácido clorhídrico (concentrado),  $\text{HCl}$ : debe ser analizado para determinar el nivel de impurezas. Si el blanco es menor al límite de detección del método, entonces, el ácido se puede utilizar.
- d. El peróxido de hidrógeno (30%):  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Oxidante debe ser analizado para determinar el nivel de impurezas.

## III. Procedimiento.

La muestra de la planta puede ser puesta en forma de solución a través de la digestión con ácidos, se disuelven las partes sólidas de la planta y llevan el nutriente contenido en las plantas en forma líquida para su posterior estimación. Esto se llama digestión húmeda. Para este caso se utilizó  $\text{HNO}_3$  concentrado y al 1:1 de disolución con agua.

La muestra de la planta también se puede calentar a altas temperaturas para destruir materia orgánica (MO), y la ceniza así obtenida se puede disolver en ácidos para llevar la muestra en forma líquida para la estimación. Este método se llama incineración en seco.



L

Se usó un vidrio de reloj o un sistema de recuperación de vapor, permitiendo que la solución se evapore hasta que se obtenga aproximadamente un volumen de 5 mL. Se calentó a  $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  sin alcanzar la temperatura de ebullición durante dos horas.

Se mantuvo la cubierta de la solución por encima del fondo del recipiente (beaker) en todo momento.

Después que los pasos anteriores se han completado y la muestra se ha enfriado, se añadió 2 mL de agua y 3 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%. El recipiente se cubrió con un vidrio de reloj o un dispositivo de recuperación de vapor.

El frasco se devolvió a la fuente de calor (Hot plate) para iniciar la reacción de peróxido. Se tuvo cuidado para asegurar que las pérdidas no se produjeran debido a la efervescencia excesivamente vigorosa.

Se calentó hasta que disminuyó la efervescencia y después se dejó enfriar el recipiente.

Se continuó añadiendo  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30% en alícuotas de 1 mL (gota a gota), con calentamiento hasta que fue mínima la efervescencia, o hasta que no se notó cambio en el aspecto general de la muestra.

**NOTA:** No se agregó más de un total de 8 mL  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%.

La muestra se cubrió con un vidrio de reloj o un dispositivo de recuperación de vapor y se continuó el calentamiento del digestado ácido-peróxido hasta que el volumen se redujo aproximadamente a 5 mL.

En el paso anterior, se calentó la muestra en el Hot-plate a  $95^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  sin hervir durante dos horas. Se mantuvo la cubierta de la solución por encima del fondo del recipiente en todo momento.

M

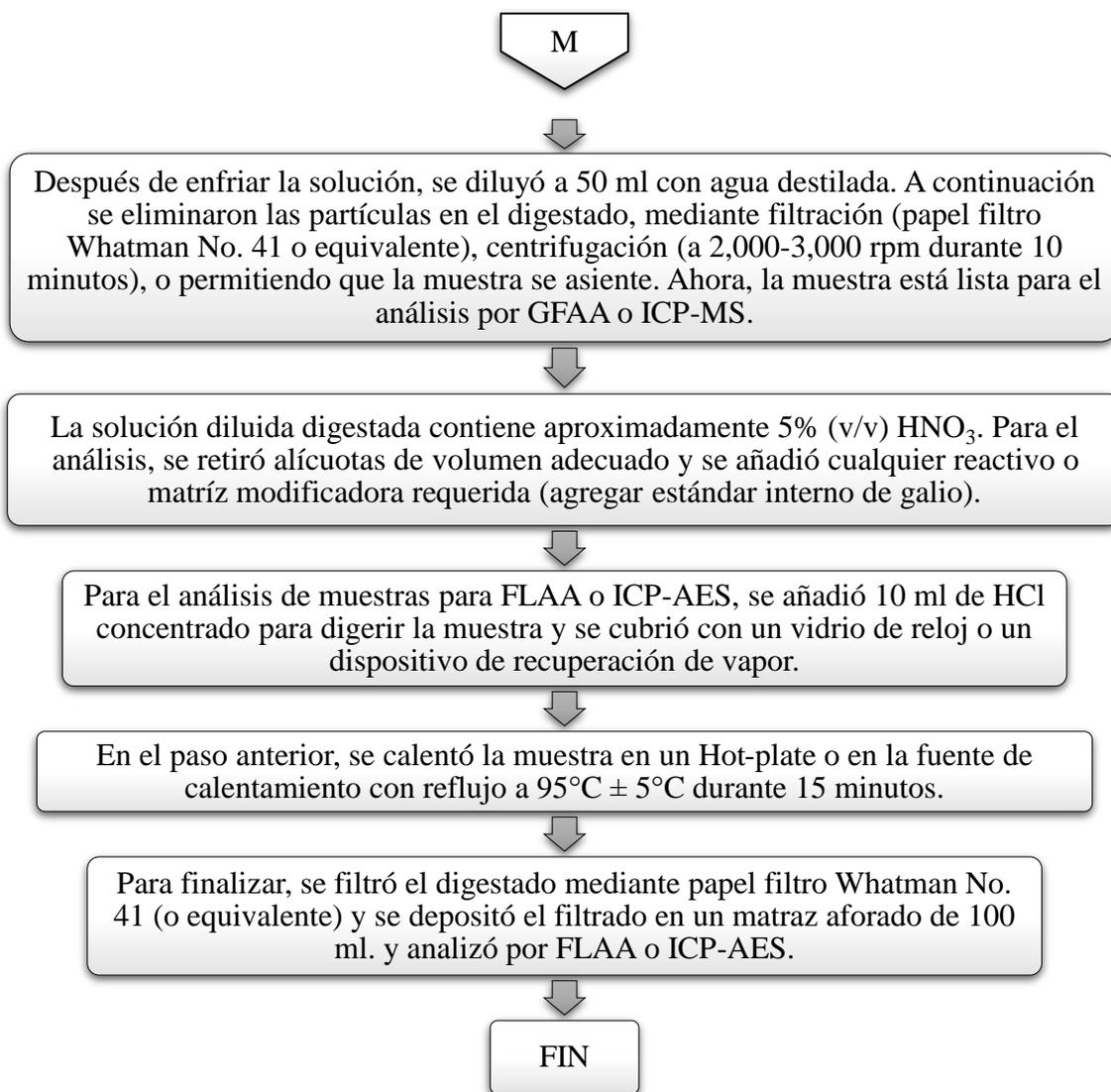


Figura A. 13. Procedimiento de digestión de matriz de biomasa. Fuente: Agencia de Protección Ambiental (1996). *Método 3050B. Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos.*

## ANEXO 14. Límites de detección del espectrofotómetro iCE 3000.

### iCE 3000 Series AA

#### Detection Limits

Element	Wavelength (nm)	Flame mg/L (ppm)	STAT mg/L (ppm)	Furnace µg/L* (ppb)	Zeeman Furnace µg/L* (ppb)	Vapour µg/L (ppb)
Aluminium	309.3	0.028	n/a	0.13	0.21	n/a
Antimony	217.6	0.092		0.29	0.4	0.06
Arsenic	193.7	0.12		0.33	0.53	0.05
Barium	553.6	0.031	n/a	0.23	0.5	n/a
Bismuth	223.1	0.0049		0.26	0.48	0.1
Cadmium	228.8	0.0028	0.001	0.01	0.02	
Calcium	422.7	0.0037	n/a			n/a
Chromium	357.9	0.0054	n/a	0.025	0.025	n/a
Cobalt	240.7	0.01				n/a
Copper	324.8	0.0045	0.003	0.065	0.29	n/a
Gold	242.8	0.013	0.005			n/a
Iron	248.3	0.0043		0.06	0.18	n/a
Lead (1)	217.0	0.013	0.006	0.03	0.11	
Lead (2)	283.3	0.016		0.08	0.07	
Lithium	670.8	0.0021				n/a
Magnesium	285.2	0.0022				n/a
Manganese	279.5	0.0016		0.03	0.06	n/a
Mercury (1)	253.7		0.11			0.06
Mercury (2)	253.7					0.03
Molybdenum	313.3	0.021	n/a	0.14	0.31	n/a
Nickel	232.0	0.008		0.065	0.16	n/a
Potassium	766.5	0.0009				n/a
Selenium	196.0	0.23	0.08	0.32	0.8	0.15
Silicon	251.6		n/a			n/a
Silver	328.1	0.0032	0.01	0.04	0.04	n/a
Sodium	589.0	0.0037				n/a
Tellurium	214.3	0.054	0.03			0.1
Thallium	276.8	0.014	0.07	0.15	0.5	n/a
Tin	224.6	0.21				0.2
Titanium	365.4	0.05	n/a	4.0	6.1	n/a
Vanadium	318.5	0.11	n/a	0.7	2.7	n/a
Zinc	213.9	0.0033	0.001			n/a

n/a = not available, cannot be used for this element.

\* Furnace figures based on 20µl injections

Lead (1) and Lead (2) are different atomic lines

Mercury (1) = Vapour using VP100 and borohydride reductant

Mercury (2) = Vapour using VP100 and stannous chloride reductant.

Figura A. 14. Límites de detección para el espectrofotómetro iCE 3000. Fuente: Thermo Fisher Scientific (2016). *Espectrofotómetro de Absorción Atómica iCE™ 3000*.

## ANEXO 15. Cuadro de calibración de equipo en voltaje y amperaje.

Tabla A. 2. Cuadro de calibración de equipo en voltaje y amperaje para el análisis por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.

Pausa de funcionamiento (días)		0,5 a 3	3 a 30	Mayor 30 o nuevo tubo de rayos X
<b>High Voltage / residencia</b>	<b>20 kV</b>	30 s	30 s	30 s
	<b>25 kV</b>	30 s	30 s	30 s
	<b>30 kV</b>	30 s	2 min	2 min
	<b>35 kV</b>	30 s	2 min	2 min
	<b>40 kV</b>	30 s	5 min	5 min
	<b>45 kV</b>	30 s	5 min	10 min
	<b>50 kV</b>	1 min	10 min	15 min
	<b>55 kV</b>	2 min	10 min	15 min
<b>El tiempo total de 55 kV</b>		6 min	35 min	50 min

Fuente: Siemens. *Manual del generador de rayos X KRISTALLOFLEX 760*. N° de referencia C79000.

## ANEXO 16. Procedimiento de obtención de espectro del cuarzo.

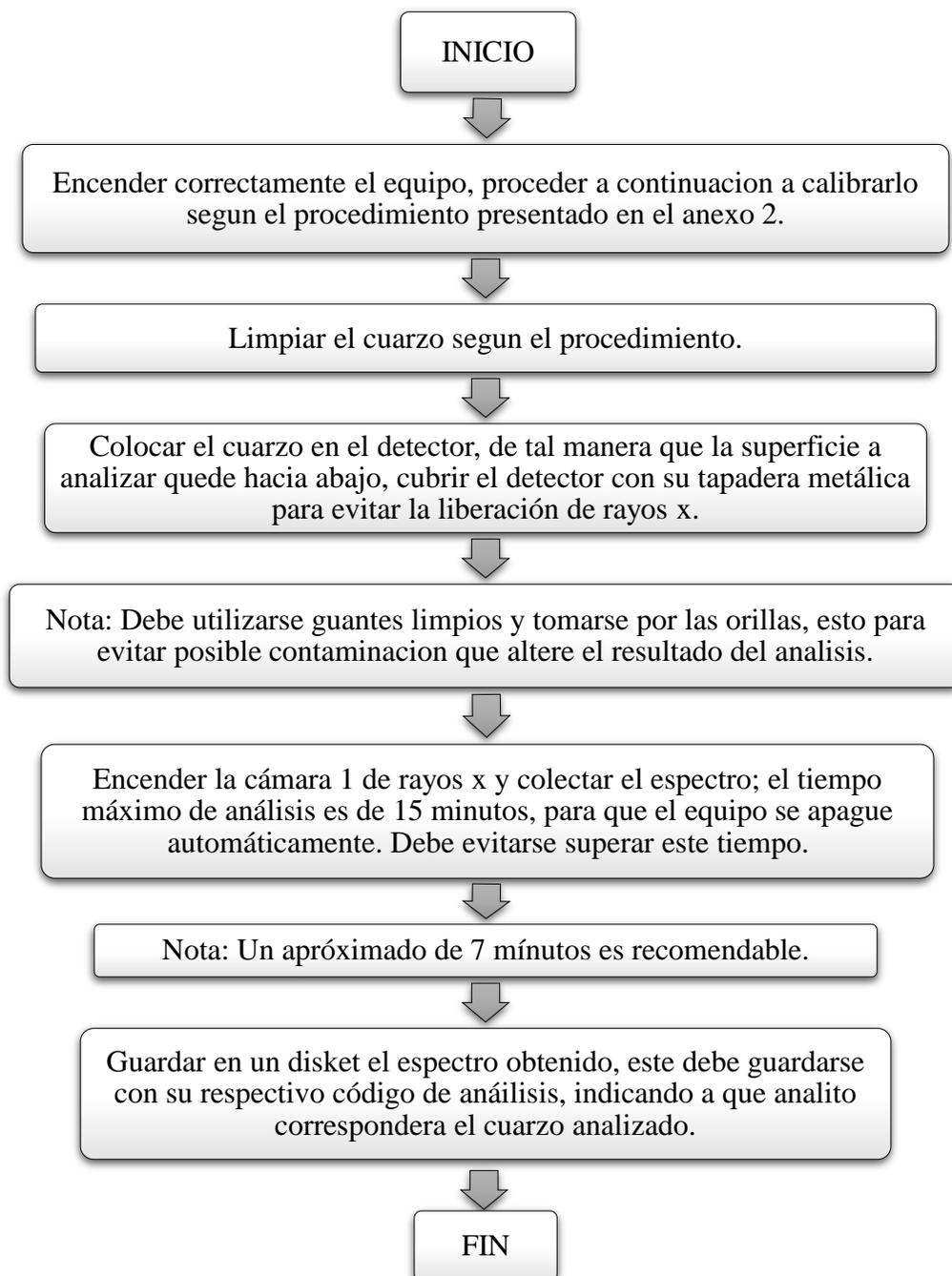


Figura A. 15. Procedimiento de obtención del espectro de cuarzo por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 17. Procedimiento de obtención de espectros por fluorescencia de rayos X por reflexión total.**

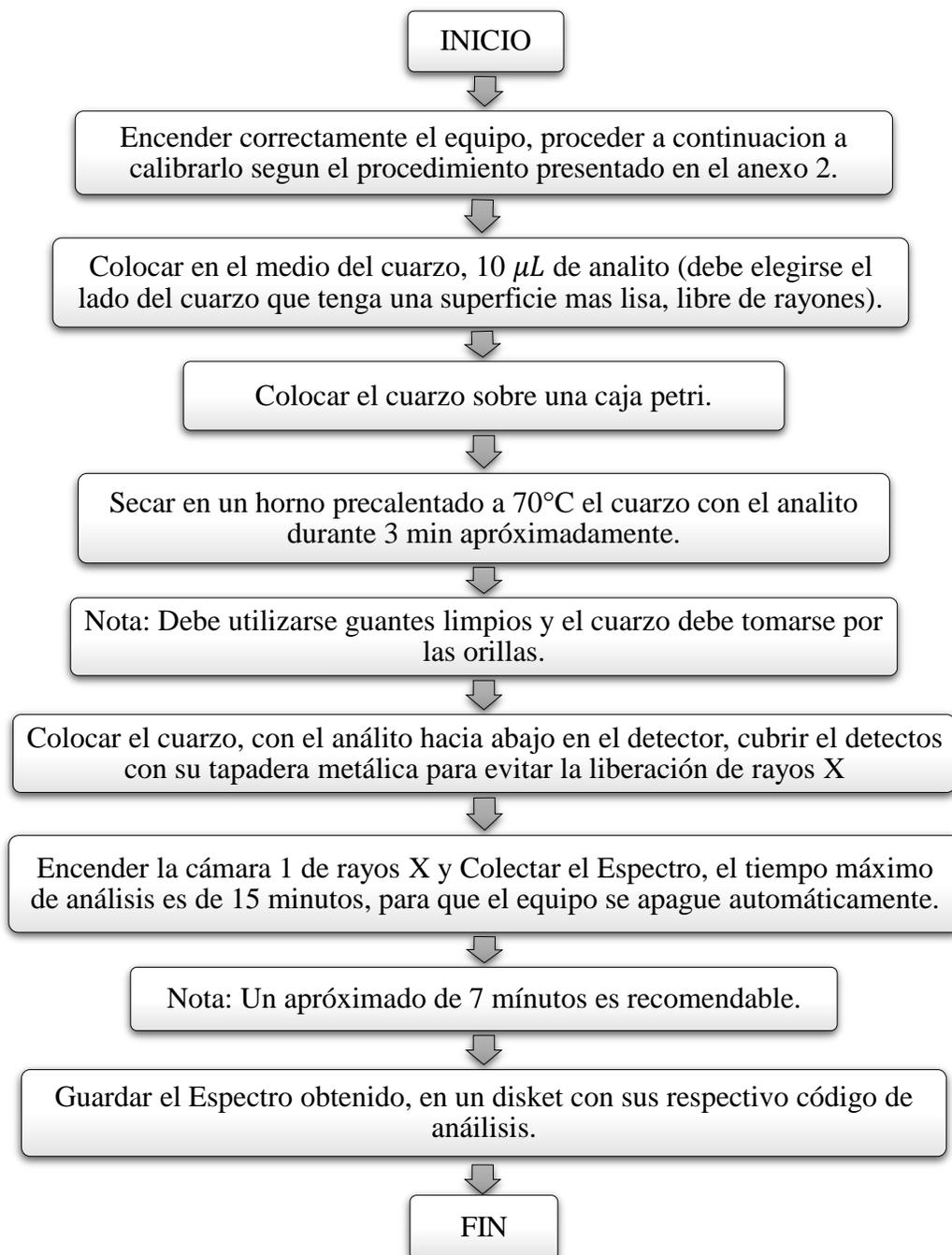


Figura A. 16. Procedimiento para obtención de los espectros de las diferentes matrices por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 18. Certificado estándar de Galio 1000 mg/L MERCK 1.0260.0100, utilizado como estándar interno a 1 y 5 ppm en solución de muestra final.**

**CERTIFICATE OF ANALYSIS  
MERCK**

# código (nuevo)  
1.70319.0100

**1.02620.0100 Gallium Standard 1000 mg/l for ICP**

Gallium in 5% nitric acid/trace hydrochloric acid      Lot No.: K26417220

Assay:                      1010 ± 2 mg/l

Analysis:                  Complexometric titration with Titriplex III solution 0,1 mol/l

Traceability:            This standard has been prepared using gravimetric procedures. All balances are regularly calibrated against PTB and NIST standards. Calibration standards used for the analysis of the assay have been calibrated against the corresponding NIST SRM 3119a, lot #890709.

This solution is intended for use as a calibration standard for plasma emission spectroscopy (e.g. ICP, DCP). It is a single element solution, that was prepared from pure gallium (99.9999 %) which has been dissolved in high purity nitric acid (HNO<sub>3</sub>) with a trace of hydrochloric acid (HCl) and diluted with filtered (0.22 µm) 18 megohm deionized water. All trace level elements were determined by ICP or DCP. These analysis values are subject to unavoidable systematic variations in this concentration range. They therefore do not form part of our guarantee and are subsequently no subject of release. Concentrations are given in µg/ml.

Ag <.02	Al <.04	As <.2	Au <.08	B <.02	Ba <.003
Be <.003	Bi <.2	Ca .005	Cd <.02	Ce <.3	Co <.02
Cr <.02	Cu <.02	Dy <.03	Er <.02	Eu <.02	Fe <.02
Ga *	Gd <.07	Ge <.1	Hf <.05	Hg <.2	Ho <.02
In <.2	Ir <.2	K <.5	La <.03	Li <.02	Lu <.02
Mg <.002	Mn <.02	Mo <.04	Na <.1	Nb <.05	Nd <.05
Ni <.02	Os <.2	P <.1	Pb <.1	Pd <.1	Pr <.06
Pt <.2	Re <.1	Rh <.02	Ru <.05	S <.05	Sb <.2
Sc <.01	Se <.5	Si <.04	Sm <.04	Sn <.1	Sr <.003
Ta <.1	Tb <.06	Te <.5	Th <.2	Ti <.02	Tl <.1
Tm <.04	U <.4	V <.02	W <.2	Y <.02	Yb <.01
Zn <.02	Zr <.04				

Minimum shelf life:              36 months

Date of release:                    April 12, 1999

  
 Dr. Kerstin Reider  
 Central Analytical Laboratory

Figura A. 17. Certificado del estándar de Galio 1000 mg/L MERCK 1.0260.0100, utilizado como estándar interno a 1 y 5 ppm en solución de muestra final. Fuente: MERCK.

**ANEXO 19. Certificado estándar solution IV CERTIPUR MERCK 1.11355.011. utilizado para la creación de las curvas de calibración para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total.**

**MERCK**

Certificate of Analysis  
CertiPUR® Reference Material

---

**ICP Multi Element Standard Solution IV CertiPUR®**  
**1.11355.0100** Lot.-No. **HC825498**

*This product is intended for use as a reference material in atomic spectrometry. It has been produced from high purity salts, using gravimetric procedures. The concentration of the elements in this solution is analysed by ICP-OES real-time internal standardization using NIST standard reference materials for calibration.*

Composition and concentration:			NIST Standard Reference Material	
Ag (Silver)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3151	Batch Code 992212
Al (Aluminium)	1008 ± 10	mg/l	SRM 3101a	Batch Code 060502
B (Boron)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3107	Batch Code 070514
Ba (Barium)	1022 ± 10	mg/l	SRM 3104a	Batch Code 070222
Bi (Bismuth)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3106	Batch Code 991212
Ca (Calcium)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3108a	Batch Code 050825
Cd (Cadmium)	1007 ± 10	mg/l	SRM 3108	Batch Code 060531
Co (Cobalt)	1007 ± 10	mg/l	SRM 3113	Batch Code 060630
Cr (Chromium)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3112a	Batch Code 030730
Cu (Copper)	1007 ± 10	mg/l	SRM 3114	Batch Code 011017
Fe (Iron)	1006 ± 10	mg/l	SRM 3126a	Batch Code 051031
Ga (Gallium)	1003 ± 10	mg/l	SRM 3119a	Batch Code 890709
In (Indium)	1007 ± 10	mg/l	SRM 3124a	Batch Code 991219
K (Potassium)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3141a	Batch Code 051220
Li (Lithium)	1010 ± 10	mg/l	SRM 3129a	Batch Code 000505
Mg (Magnesium)	1008 ± 10	mg/l	SRM 3131a	Batch Code 050302
Mn (Manganese)	1011 ± 10	mg/l	SRM 3132	Batch Code 050429
Na (Sodium)	1009 ± 10	mg/l	SRM 3152a	Batch Code 010728
Ni (Nickel)	1009 ± 10	mg/l	SRM 3136	Batch Code 000612
Pb (Lead)	1009 ± 10	mg/l	SRM 3128	Batch Code 030721
Sr (Strontium)	1008 ± 10	mg/l	SRM 3153a	Batch Code 990904
Tl (Thallium)	1010 ± 10	mg/l	SRM 3159	Batch Code 990812
Zn (Zinc)	1008 ± 10	mg/l	SRM 3168a	Batch Code 001402

Matrix: Nitric acid 1 mol/l  
 Density: 1.089 g/cm<sup>3</sup> (20°C)  
 Package: 100 ml PE-bottles

*It is recommended to shake the solution thoroughly prior to use. Never pipet directly from the bottle. Prepare working solutions upon requirement by dilution with 1 molar nitric acid.*

Date of release: 2009-01-27  
 Minimum shelf life: 2012-01-31

*A. Yildirim*  
 Dipl.-Ing. Ayfer Yildirim

Figura A. 18. Certificado de la estándar solution IV CERTIPUR MERCK 1.11355.011 utilizada para la creación de las curvas de calibración para la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total. Fuente: MERCK.

**ANEXO 20. Ejemplo de espectros obtenidos por el análisis de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total.**

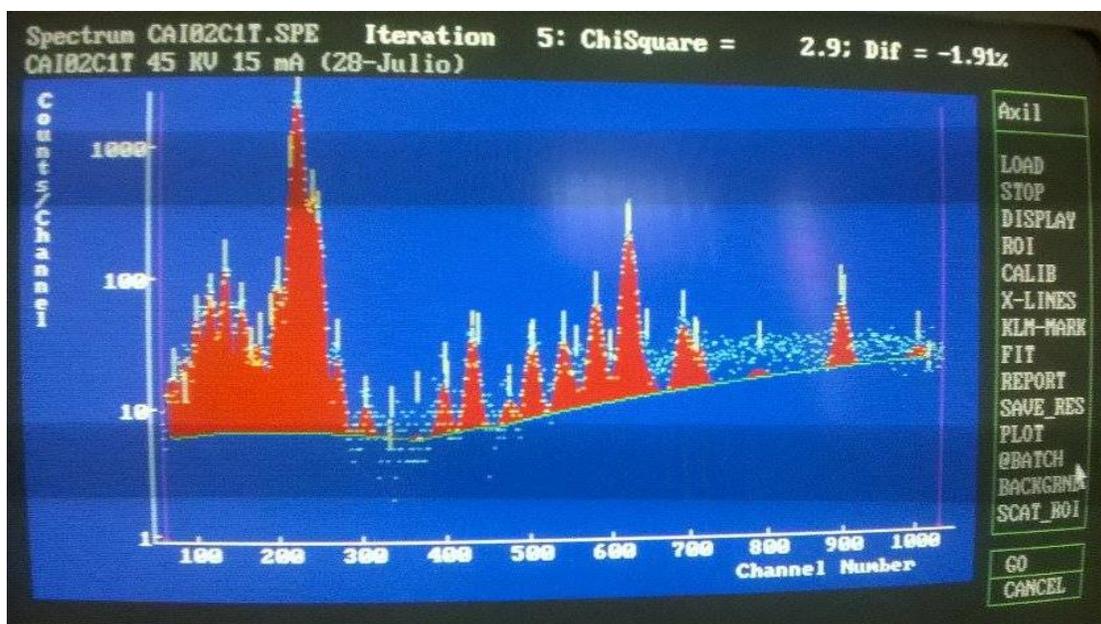


Figura A. 19. Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de biomasa. Fuente: Elaboración propia.

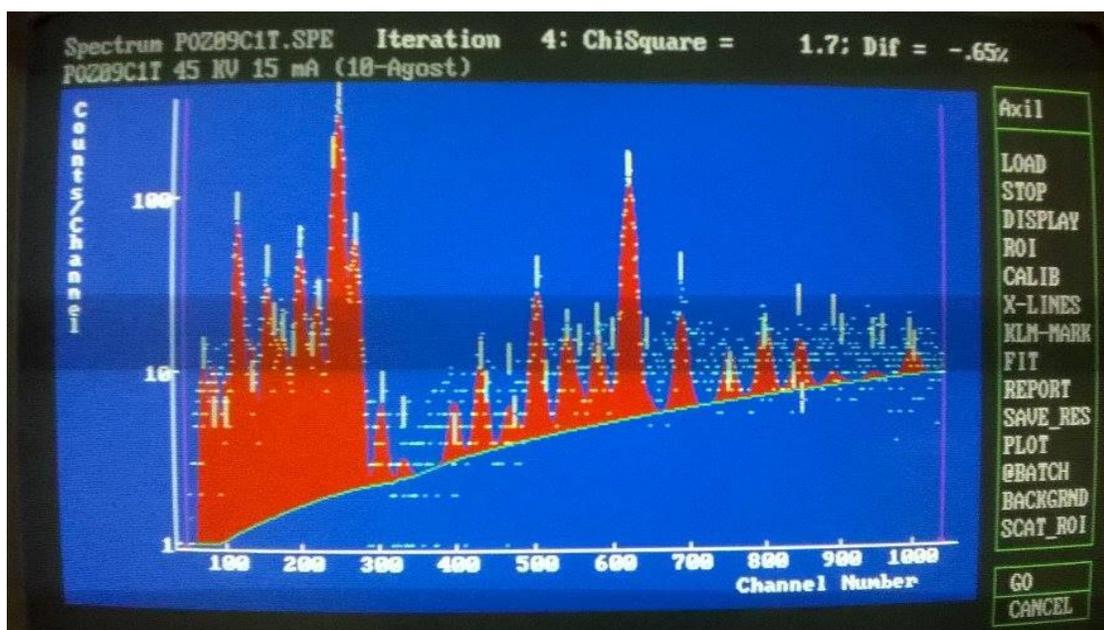


Figura A. 20. Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de agua subterránea. Fuente: Elaboración propia.

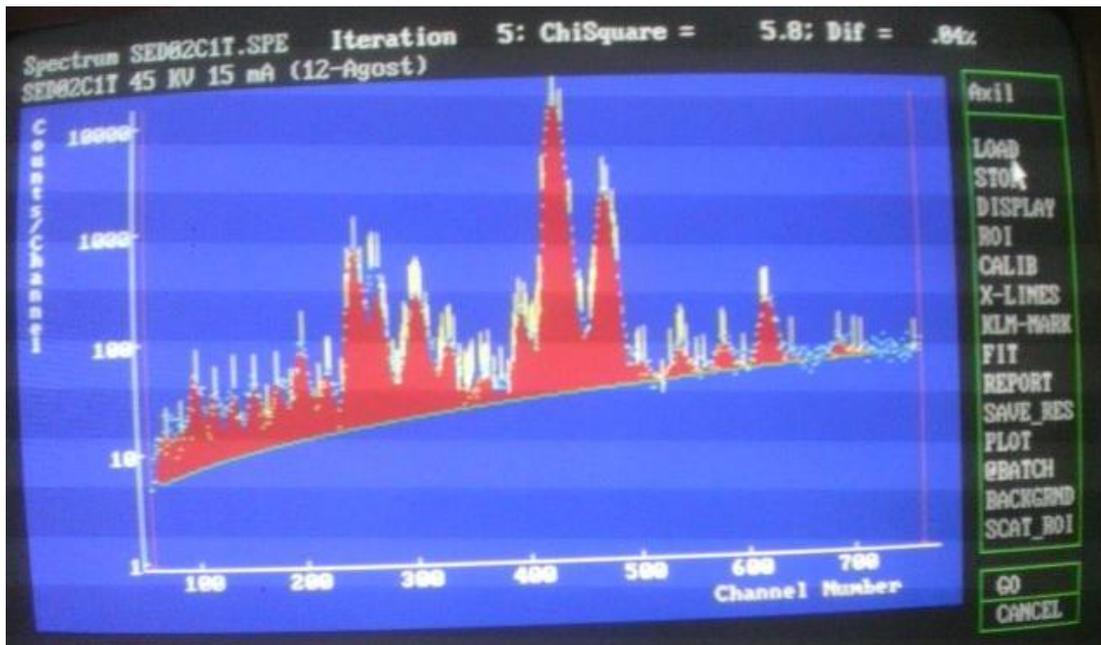


Figura A. 21. Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de sedimento. Fuente: Elaboración propia.

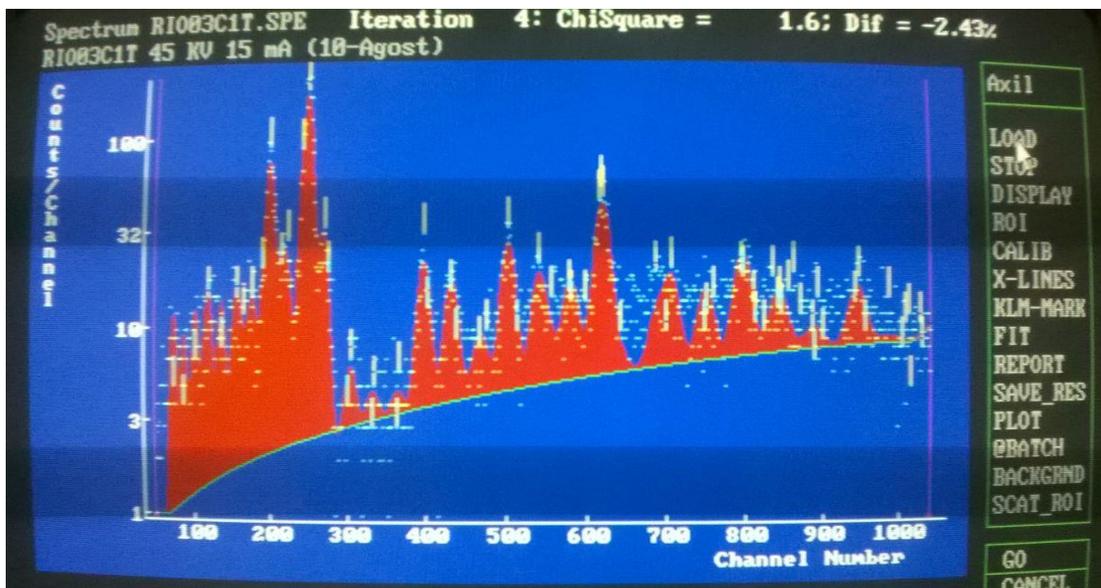


Figura A. 22. Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de agua superficial. Fuente: Elaboración propia.

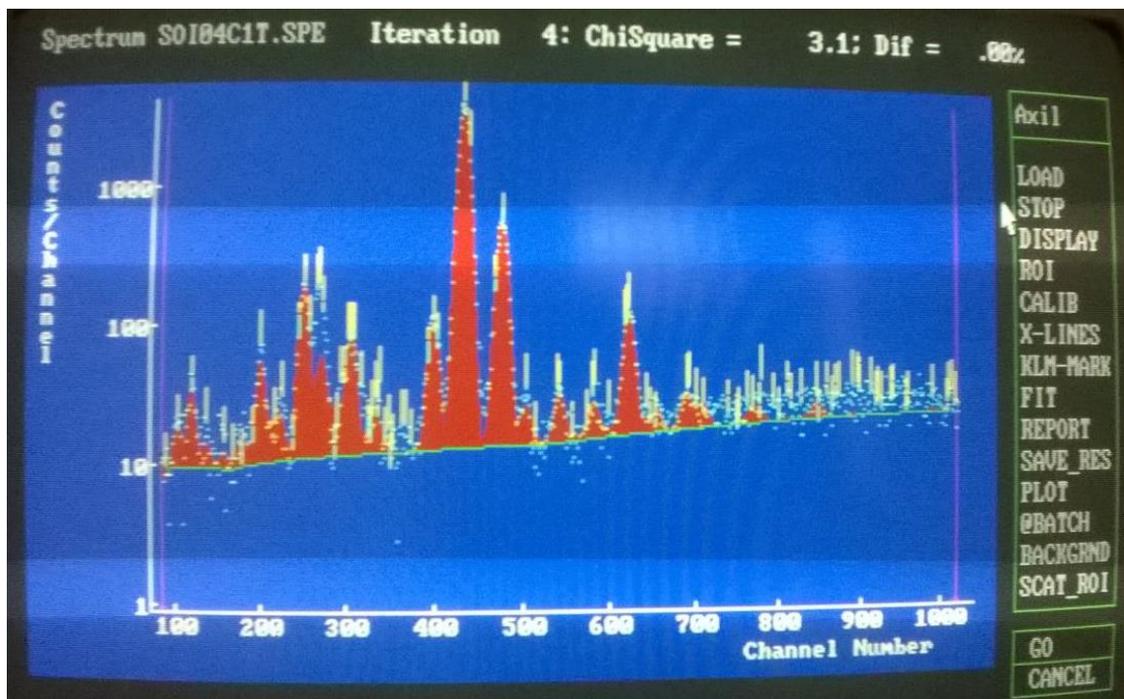


Figura A. 23. Espectro obtenido por la técnica de fluorescencia de rayos X por reflexión total para la matriz de suelo. Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 21. Resumen del mapa de concentraciones para las matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.**

Tabla A. 3. Resumen de las concentraciones de Ni, Pb y Zn para las matrices de agua superficial, sedimento y agua subterránea.

<b>Matríz</b>	<b>Punto</b>	<b>Código de muestra</b>	<b>Conc. Zn* (ppm)</b>	<b>Conc. Ni** (ppm)</b>	<b>Conc. Pb** (ppm)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
<b>Agua superficial</b>	RPAS01	H2ORIO01	0.5850	0.0000	0.0000	13.576165	-89.660964
	RPAS02	H2ORIO02	0.5380	0.0000	0.0000	13.575376	-89.662067
	RPAS03	H2ORIO03	0.6040	0.0000	0.0000	13.572512	-89.666802
	RPAS04	H2ORIO04	0.8240	0.0000	0.0000	13.571477	-89.670387
<b>Sedimento</b>	RPSE01	SEDRIO01	23.1309	5.1159	1.0071	13.576165	-89.660964
	RPSE02	SEDRIO02	13.2581	4.1683	4.5449	13.575376	-89.662067
	RPSE03	SEDRIO03	17.2769	4.5509	2.0752	13.572512	-89.666802
	RPSE04	SEDRIO04	15.2097	4.1079	14.0759	13.571477	-89.670387
<b>Agua subterránea</b>	POZO02	H2OPOZ01	0.4980	0.0000	0.0000	13.578267	-89.657900
	POZO04	H2OPOZ02	0.4720	0.0000	0.0000	13.574433	-89.667433
	POZO05	H2OPOZ03	0.2280	0.0000	0.0000	13.571067	-89.670883
	POZO07	H2OPOZ04	0.1990	0.0000	0.0000	13.566717	-89.673667
	POZO09	H2OPOZ05	0.1780	0.0000	0.0000	13.580183	-89.663683
	POZO10	H2OPOZ06	0.1680	0.0000	0.0000	13.570950	-89.670683
	POZO11	H2OPOZ07	0.2130	0.0000	0.0000	13.570700	-89.670683
	POZO12	H2OPOZ08	0.2220	0.0000	0.0000	13.570950	-89.669133
	POZO13	H2OPOZ09	0.2030	0.0000	0.0000	13.570017	-89.666283
	POZO15	H2OPOZ10	0.3270	0.0000	0.0000	13.568933	-89.666717
POZO16	H2OPOZ11	0.5630	0.0000	0.0000	13.563833	-89.675133	

\*Concentraciones obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos x por reflexión total

\*\*Concentraciones obtenidas por la técnica Absorción Atómica con horno de grafito

Fuente: Elaboración propia.

## ANEXO 22. Resumen de mapa de concentraciones para las matrices de biomasa y suelo.

Tabla A. 4. Resumen de las concentraciones de Ni, Pb y Zn para las matrices de biomasa y suelo.

<b>Matríz</b>	<b>Punto</b>	<b>Código de muestra</b>	<b>Conc. Zn* (ppm)</b>	<b>Conc. Ni** (ppm)</b>	<b>Conc. Pb** (ppm)</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
<b>Biomasa</b>	CULT10	BIA YOT01	29.7273	1.2202	0.0000	13.570983	-89.666883
	CULT11	BIA YOT02	61.1244	1.3906	0.0000	13.564183	-89.669250
	CULT09	BIA YOT03	13.8166	1.0312	0.0000	13.570900	-89.670883
	CULT04	BICAÑA01	28.6071	0.6112	0.0000	13.569383	-89.667133
	CULT04	BICAÑA02	40.5147	1.7578	0.0000	13.568350	-89.668367
	CULT07	BICAÑA03	52.9423	1.0308	0.0000	13.573000	-89.667950
	CULT07	BICAÑA04	43.3760	0.5053	0.0000	13.575250	-89.665800
	CULT10	BICAÑA05	14.7162	0.4555	0.0000	13.570983	-89.666883
<b>Suelo</b>	SUEL06	SUELOA01	11.4410	2.1330	7.8410	13.569167	-89.666933
	SUEL06	SUELOA02	13.0061	2.7817	3.6863	13.569383	-89.667133
	SUEL06	SUELOA03	19.2673	4.1641	2.2933	13.568350	-89.668367
	SUEL09	SUELOA04	9.1080	3.9107	3.4212	13.573000	-89.667950
	SUEL09	SUELOA05	16.1083	3.5308	1.8848	13.575250	-89.665800
	SUEL11	SUELOA06	17.2770	4.7518	1.5653	13.570983	-89.666883
	SUEL12	SUELOA07	19.6191	3.7526	2.4732	13.564183	-89.669250
	SUEL13	SUELOA08	18.1794	3.2447	3.3952	13.570900	-89.670883
	SUEL04	SUELOA09	20.7427	4.5426	5.2518	13.572883	-89.669817
	SUEL05	SUELOA10	16.4579	3.8226	5.9419	13.570467	-89.671250

\*Concentraciones obtenidas por la técnica Fluorescencia de rayos x por reflexión total

\*\*Concentraciones obtenidas por la técnica Absorción Atómica con horno de grafito

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 23. Cálculo de la dirección de flujo de agua subterránea para la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.**

El estudio de las superficies piezométricas permite obtener información básica sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea, como es el caso de la dirección del flujo del agua subterránea, la ubicación de zonas de recarga y descarga del acuífero, la existencia de heterogeneidades hidráulicas tales como cambios de permeabilidad dentro de una misma formación litológica o cambios de acuífero, la existencia de niveles acuíferos libres y confinados superpuestos o adyacentes, la existencia de flujos verticales o laterales entre formaciones distintas, entre otros.

Para el trazado de superficies piezométricas, sólo es posible obtener valores del nivel piezométrico en un conjunto de puntos discretos de un acuífero (pozos, sondeos y manantiales), a partir de ellos deben trazarse las curvas de nivel (isopiezas) que sirvan para definir la superficie piezométrica.

El trazado de las isopiezas de un acuífero o sector de acuífero requiere, en primer lugar, dos cosas: que los valores de nivel (freático o piezométrico) medidos correspondan a un mismo acuífero y que estén expresados en cotas absolutas (m sobre el nivel del mar).

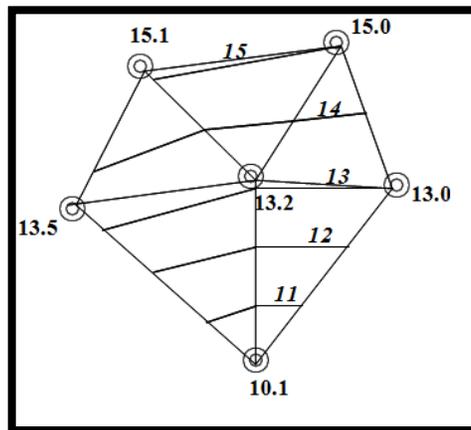


Figura A. 24. Trazado de las líneas isopiezas mediante interpolación a partir de cinco valores de nivel piezométrico medidos. Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezometricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

Lo que se mide en los pozos y sondeos es la profundidad del agua desde un punto concreto del terreno o del borde de la entubación, ese punto debe estar correctamente nivelado para poder transformar la profundidad en cota.

Una vez comprobado el primer requisito y realizada la transformación, la determinación del lugar por el cual pasan las isopiezas se realiza mediante interpolación geométrica sobre el mapa (véase Figura A.24).

Se supondrá que el medio es homogéneo e isótropo y que el nivel varía gradualmente, pero a la hora de dibujar la traza de las isopiezas se tendrán en cuenta los siguientes requisitos y precauciones:

- I. La traza de las isopiezas debe ser coherente con la topografía (véase Figura A.25), en acuíferos libres la superficie freática no puede estar más alta que el terreno y en acuíferos confinados las isopiezas sí pueden estar más elevadas que la superficie del terreno: es el caso de los niveles piezométricas de partes profundas del acuífero cerca de la zona de descarga del mismo (véase Figura A.26, pozo surgente).

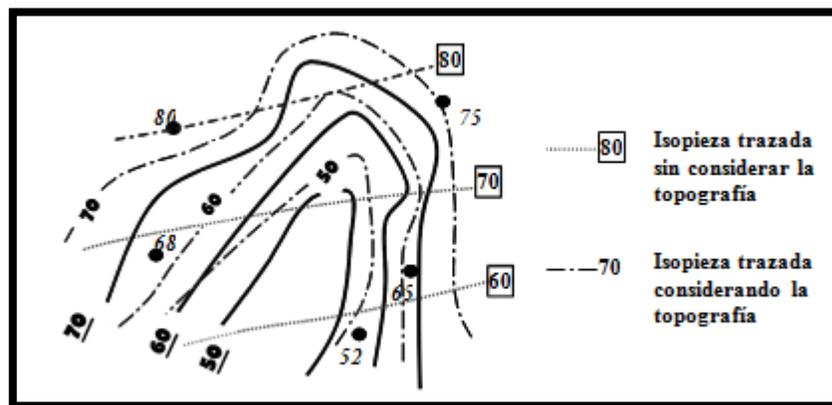


Figura A. 25. Diferencia en el trazado de las isopiezas en un acuífero libre situado en una zona de relieve abrupto al tener o no en cuenta la topografía. Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezométricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

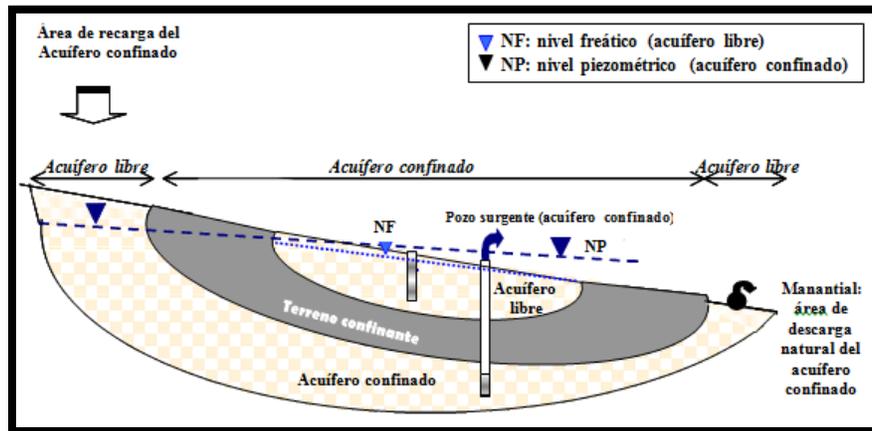


Figura A. 26. Ilustración de los conceptos de acuífero libre y confinado, nivel freático, nivel piezométrico y pozo surgente. Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezometricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

- II. Las isopiezas deben ser perpendiculares a los límites impermeables del acuífero (Fig. A.27a) y paralelas a las superficies y líneas de nivel constante (lagos, mar, etc.) que tengan conexión hidráulica con el acuífero (véase Figura A.26).

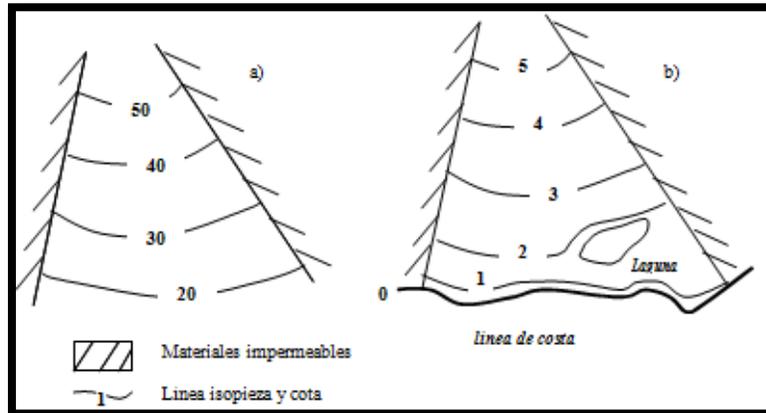


Figura A. 27. Isopiezas perpendiculares a los límites impermeables e isopiezas paralelas a los cuerpos superficiales de agua de nivel constante. Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezometricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

- III. Relación entre las líneas de drenaje del acuífero y las isopiezas: las isopiezas se cierran de forma cóncava sobre las líneas que drenan al acuífero (Fig. A.28a) y de forma convexa sobre las líneas que son drenadas por el acuífero (véase Figura A.28b).

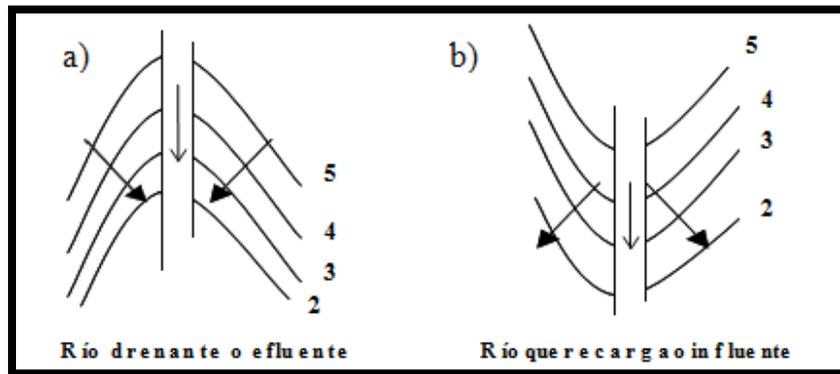


Figura A. 28. Las isopiezas se cierran de forma cóncava contra las líneas que drenan el acuífero (río) y convexa contra las líneas que lo recargan. Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezometricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

- IV. La separación espacial entre isopiezas será menor cuando aumente el gradiente hidráulico (i) por alguna de estas razones: disminución de la permeabilidad del medio; existencia de una zona de descarga natural del acuífero; existencia de bombeos (véase Figura A.29).

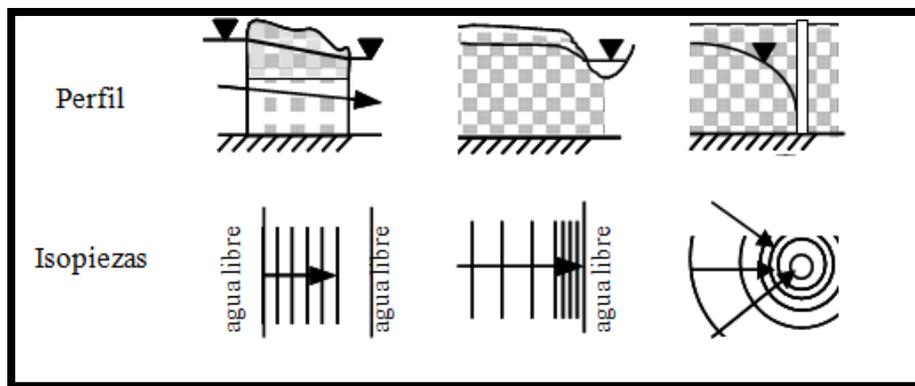


Figura A. 29. La separación entre isopiezas disminuye cerca de áreas de descarga natural y de pozos en bombeo (el gradiente hidráulico aumenta). Fuente: Manzano Arellano, M. (2008). *Guía de practica de trazado e interpretación de superficies piezometricas*. Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena.

- V. Las isopiezas cuyo trazado sea deductivo, es decir, no estén apoyadas en niveles medidos, se dibujarán con trazo discontinuo y se indicarán en la leyenda como “trazado supuesto”.

- VI. Los puntos con valores de nivel anómalos respecto a los de su entorno deben ser desechados en el trazado de las isopiezas: un valor anómalo sin causa técnica o hidrogeológica conocida puede corresponder a un error de medida, a un nivel de otro acuífero distinto al que se está estudiando, a un pozo/sondeo en deficiente estado de conservación y con conexión hidráulica con el acuífero limitada, a un pozo/sondeo ranurado en varios niveles acuíferos (caso de acuíferos multicapa) y con entrada preferente de agua por uno de esos niveles.

Con los valores obtenidos en las visitas exploratorias (véase Tabla A.5) y descartando aquellos pozos que se encontrasen totalmente cerrados, se procedió a realizar la determinación de dirección de flujo de agua subterránea.

Tabla A. 5. Coordenadas de los pozos abiertos en la zona de influencia del relleno sanitario de Sonsonate, El Salvador.

Generalidades			Datos de Muestreo.		
N. de pozo	Coordenadas		Profundidad del agua	Diámetro del pozo	Altura brocal
5	13°34.264' N	89°40.253' W	6.10 m	0.73 m	0.53 m
9	13°34.811' N	89°39.821' W	6.69 m	1.05 m	0.45 m
10	13°34.257' N	89°40.241' W	6.37 m	0.80 m	1.15 m
11	13°34.242' N	89°40.241' W	4.49 m	0.90 m	1.03 m

Fuente: Elaboración propia.

Una capa freática es una acumulación de agua subterránea que se encuentra a una profundidad relativamente pequeña bajo el nivel del suelo. Concretamente es un acuífero, con la diferencia de que los acuíferos pueden estar también a mayores profundidades.

De ellas se alimentan los pozos y las fuentes de agua, potable o no. Son los acuíferos más expuestos a la contaminación proveniente de la superficie.

Una capa freática suele estar limitada por dos superficies. La inferior suele ser un estrato de terreno impermeable a una profundidad más o menos grande. Por encima hay una zona saturada, la capa freática en sí, cuyo límite superior puede ser un estrato impermeable o no.

Este límite es el que se llama nivel freático. Si el terreno que está por encima de ese nivel es permeable, se tratará, normalmente de una zona insaturada.

Por superficie freática, se entiende la parte del suelo saturada de agua, es decir, aquella en que entre los granos de tierra están completamente llenos de agua. Si el estrato que está por encima no es impermeable, habrá tierras no saturadas, cuyos intersticios contienen, además de agua, también aire.

Un mapa de isopiezas refleja la forma de la superficie freática o de la superficie piezométrica, según se trate de un acuífero libre o confinado, igual que un mapa topográfico refleja la forma de la superficie del terreno

La superficie freática es una superficie real, que constituye el límite superior de la parte saturada del acuífero libre, mientras que en el acuífero confinado o semi-confinado, la superficie piezométrica es una superficie virtual, definida por la altura a la que llegaría la columna de agua si existiera un piezómetro en cada punto.

En el acuífero libre, las líneas isopiezas son las intersecciones de las superficies equipotenciales con la superficie freática, mientras que en el confinado las superficies equipotenciales están, lógicamente, dentro del acuífero, mientras que la superficie piezométrica con sus curvas isopiezas se encuentra varios metros por encima.

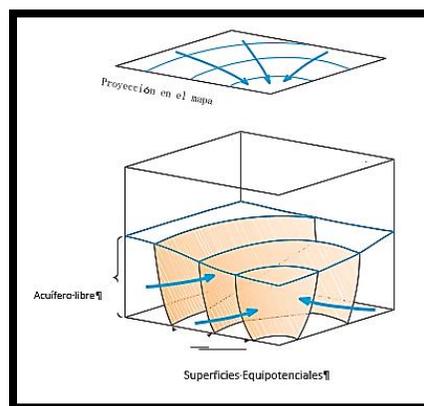


Figura A. 30. Mapa de isopiezas. Fuente: Elaboración propia.

