



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**  
**INGENIERÍA EN MEDIO AMBIENTE**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL  
DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de Ingeniería en Medio  
Ambiente

**Autoras:**

De la Cruz Casco Yulisa Nicolle

Guano Caiza Nayeli Aracelly

**Tutor:**

Ing. Moreno Ávila Andrés Sebastián, Mg

Latacunga- Ecuador

FEBRERO 2025



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

De la Cruz Casco Yulisa Nicolle, con cédula de ciudadanía No. 0504876525 y Guano Caiza Nayeli Aracelly, con cédula de ciudadanía No. 1755608724, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAX”**, siendo el Ingeniero Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 21 de febrero del 2025



Yulisa Nicolle De la Cruz Casco  
C.C: 0504876525  
**ESTUDIANTE**



Nayeli Aracelly Guano Caiza  
C.C: 1755608724  
**ESTUDIANTE**

## CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **DE LA CRUZ CASCO YULISA NICOLLE**, identificada con cédula de ciudadanía **0504876525** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.** - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

### **Historial Académico**

Inicio de la carrera: Abril – Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 de diciembre del 2024

Tutor: Ingeniero Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila

Tema: **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

**CLÁUSULA SEGUNDA.** - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA.** - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA.** - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

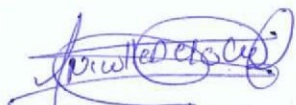
**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.** - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 21 días del mes de febrero del 2025.



Yulisa Nicolle De la Cruz Casco

**LA CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

**LA CESIONARIA**

## **CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR**

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **GUANO CAIZA NAYELI ARACELLY**, identificada con cédula de ciudadanía **1755608724** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

**ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.** - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

### **Historial Académico**

Inicio de la carrera: Abril – Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 de diciembre del 2024

Tutor: Ingeniero Mg. Andrés Sebastián Moreno Ávila

Tema: **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

**CLÁUSULA SEGUNDA.** - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

**CLÁUSULA TERCERA.** - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

**CLÁUSULA CUARTA.** - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

**CLÁUSULA QUINTA.** - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

**CLÁUSULA SEXTA.** - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

**CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.** - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

**CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.** - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

**CLÁUSULA NOVENA.** - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

**CLÁUSULA DÉCIMA.** - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

**CLÁUSULA UNDÉCIMA.** - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 21 días del mes de febrero del 2025.



Nayeli Aracelly Guano Caiza

**LA CEDENTE**

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.


**LA CESIONARIA**

## **AVAL DE TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

**“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, de De la Cruz Casco Yulisa Nicolle y Guano Caiza Nayeli, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 21 de febrero del 2025



Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.  
C.C: 0503220063  
**DOCENTE TUTOR**

## **AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN**


En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, las postulantes: De la Cruz Casco Yulisa Nicolle y Guano Caiza Nayeli Aracelly, con el título de Proyecto de Investigación: **“DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 21 de febrero del 2025



Lic. Kalina Marcela Fonseca Largo, MSc.  
C.C:1723534457  
**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**



Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante, Mg.  
C.C: 0502188451  
**LECTOR 2 (MIEMBRO)**



Ing. José Luis Agreda Oña, Mg.  
C.C: 0401332101  
**LECTOR 3 (MIEMBRO)**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios por permitirme alcanzar esta etapa tan importante en mi vida. A mis padres, Alberto y Mónica, por su amor incondicional y apoyo inquebrantable; a mis hermanos y hermanas, por estar siempre a mi lado cuando los he necesitado.*

*Extiendo mi gratitud a la Universidad Técnica de Cotopaxi por los conocimientos adquiridos durante mi formación académica, así como a los amigos que hice durante mi estancia en la universidad. Agradezco a los docentes por su enseñanza y guía a lo largo de este camino de preparación.*

*Finalmente, mi más sincero agradecimiento a nuestro tutor, el Ing. Andrés Moreno, por su apoyo, paciencia y dedicación en la elaboración de este proyecto de titulación, compartiendo con nosotros su conocimiento y experiencia en nuestra formación profesional.*

***Yulisa Nicolle De la Cruz Casco***

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios y a mi familia por darme esta dicha de convertirme en una gran profesional y también quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Ing. Andrés Moreno, quien, con su valiosa guía, paciencia y conocimientos, ha sido un mentor excepcional a lo largo de este proceso. Sus enseñanzas y consejos han sido cruciales para la culminación de esta tesis.*

*Finalmente, a todos aquellos que de una u otra manera han sido parte de esta etapa de mi vida, mi más sincero agradecimiento.*

***Nayeli Aracelly Guano Caiza***

## **DEDICATORIA**

*Con mucho cariño y gratitud, dedico este logro a mis padres, Alberto y Mónica, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y apoyo han sido mi mayor inspiración y fortaleza. Gracias por enseñarme valores, por estar siempre a mi lado y por ser el pilar en cada etapa de mi vida. A mis hermanos, por ser mi compañía en los buenos y malos momentos, por su apoyo incondicional y por motivarme a seguir adelante con confianza y amor. Y, por supuesto, a mí misma, por nunca rendirme y por demostrarme que siempre se puede seguir adelante, sin importar los desafíos.*

***Yulisa Nicolle De la Cruz Casco***

### ***DEDICATORIA***

*A mis Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud a mis padres **Jorge** y **María** quienes han sido el pilar fundamental de mi vida y mi motivación más grande para no rendirme. Su esfuerzo su dedicación y todos los sacrificios que han hecho para apoyarme se los agradezco infinitamente. Gracias por haber puesto toda su confianza en mí y*

*darle el mejor ejemplo de valentía, trabajo duro, honestidad y la perseverancia. A mi hermana **Paola** gracias por haberme escuchado reír y llorar, por el consuelo que me brindas y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A mi hermana **Jessica** por ser un apoyo y por alentarte cada día a seguir adelante a no desmayar en mis propósitos. A mi hermana **Elizabeth** por brindarme sus sabios consejos por ser esa persona que me alegra y porque me vio empezar en la escuela y ahora quiero que se sienta orgullosa de ver cómo he logrado llegar tan lejos. A mi hermano **Edison** que también ha sabido ser un padre y ha sido mi mayor inspiración porque su constancia y valentía me han inspirado a seguir adelante con mis estudios, le doy las gracias por todo su apoyo inquebrantable y sus palabras de aliento que nunca me ha hecho faltar.*

*Por último y menos importante **me dedico a mí misma**, por haber demostrado que mi determinación y perseverancia pueden superar cualquier obstáculo. Por haber recorrido un camino lleno de desafíos. Por haber creído en mi capacidad para aprender, crecer y alcanzar mis objetivos, y por haber trabajado incansablemente para hacer que ese sueño se convierta en realidad*

*Nayeli Aracelly Guano Caiza*

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**TÍTULO: “DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN EL SUELO DE LA ZONA RURAL DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

**Autoras:**

De la Cruz Casco Yulisa Nicolle  
Guano Caiza Nayeli Aracelly

## **RESUMEN**

El estudio analizó la concentración de arsénico en suelos rurales de Toacaso, Cotopaxi, para evaluar su calidad e impacto ambiental. La contaminación por metales pesados, asociada a actividades antropogénicas, representa un riesgo para los ecosistemas y la salud humana. Se recolectaron muestras de suelo en seis puntos georreferenciados (M1D, M1I, M2D, M2I, M3D y M3I) y se analizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica. Además, se utilizó el software ModelMuse (MODFLOW 6) para modelar la dispersión del contaminante, revelando que la pluma de contaminación tiende a expandirse hacia áreas vulnerables. Los resultados mostraron que cinco de los seis puntos superaron el límite permisible de arsénico (12 mg/kg, según TULSMA, 2017). La muestra M1I registró la mayor concentración (77.86 mg/kg), mientras que M2D presentó el valor más bajo (0.06 mg/kg), dentro del rango permitido. La textura arenosa del suelo (>90% de arena) facilita la movilización de contaminantes, aumentando el riesgo de dispersión.

Se concluye que la zona presenta niveles preocupantes de arsénico, lo que requiere acciones inmediatas. Se recomienda implementar programas de monitoreo continuo, medidas de remediación y control de fuentes de contaminación para mitigar riesgos ambientales y de salud pública. La prevención y gestión adecuada son clave para proteger los suelos y la comunidad de Toacaso.

**Palabras clave:** Arsénico, contaminación, suelo, pluma de contaminación

## **TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**

**FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES**

**THEME: “DETERMINATION OF HEAVY METALS IN THE SOIL OF THE RURAL AREA OF TOACASO, PROVINCE OF COTOPAXI”.**

**Authors:**

De la Cruz Casco Yulisa Nicolle  
Guano Caiza Nayeli Aracelly

## **ABSTRACT**

The study analyzed the concentration of arsenic in rural soils of Toacaso, Cotopaxi, to assess its quality and environmental impact. Heavy metal contamination, associated with anthropogenic activities, represents a risk to ecosystems and human health.

Soil samples were collected at six georeferenced points (M1D, M1I, M2D, M2I, M3D and M3I) and analyzed by atomic absorption spectrophotometry. In addition, the ModelMuse software (MODFLOW 6) was used to model the dispersion of the contaminant, revealing that the contamination plume tends to expand towards vulnerable areas.

The results showed that five of the six points exceeded the permissible limit of arsenic (12 mg/kg, according to TULSMA, 2017). Sample M1I recorded the highest concentration (77.86 mg/kg), while M2D had the lowest value (0.06 mg/kg), within the permitted range. The sandy texture of the soil (>90% sand) facilitates the mobilization of contaminants, increasing the risk of dispersion.

It is concluded that the area has worrying levels of arsenic, which requires immediate action. It is recommended to implement continuous monitoring programs, remediation measures and control of sources of contamination to mitigate environmental and public health risks. Prevention and proper management are key to protecting the soils and the community of Toacaso.

**Keywords:** Arsenic, contamination, dispersion, soil, pollution plume

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE AUTORÍA .....	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DE TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN .....	viii

<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	x
<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	xi
<i>DEDICATORIA</i> .....	xi
<i>DEDICATORIA</i> .....	xii
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	xv
ÍNDICE DE TABLAS .....	xviii
ÍNDICE FIGURAS .....	xix
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	3
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	4
4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	4
5. HIPÓTESIS .....	5
6. OBJETIVOS .....	5
6.1. Objetivo General .....	5
6.2. Objetivo Específico .....	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS .....	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA .....	9
8.1. Agua .....	9
8.1.1. Importancia del agua .....	9
8.1.2. Metales pesados .....	9
8.1.3. Los metales pesados presentes en el agua .....	10
8.2. Suelo .....	11
8.2.1. Importancia del suelo .....	11
8.2.2. Metales pesados como agentes contaminantes de los suelos .....	12
8.2.3. Tipo de suelos .....	13
8.3. Efectos en el ambiente por metales pesados .....	14
8.4. Efectos en el ser humano por metales pesados .....	14

8.5. Sedimentos .....	15
8.6. Clasificación de los sedimentos .....	15
8.7. Pluma de contaminación .....	16
8.7.1. Caracterización de las plumas contaminantes .....	16
8.7.2. Ciclo de vida de las plumas de contaminación.....	17
8.7.3. Simulación de contaminantes .....	17
8.8. Ley de Darcy .....	18
8.9. Ley de Fick.....	19
8.10. Software MODFLOW 6.....	19
9. MARCO LEGAL.....	19
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....	22
10.1. Área de Estudio.....	22
10.2. Coordenadas de la zona de estudio.....	22
10.3. Componentes Biofísico de la parroquia de Toacaso.....	23
10.4. Enfoques.....	25
10.4.1. Enfoque Descriptivo .....	25
10.4.2. Enfoque Cuantitativo .....	25
10.5. Técnicas .....	25
10.5.1. Muestreo sistemático al azar.....	26
10.6. Métodos.....	26
10.6.1. Fase de campo .....	26
10.6.2. Fase de laboratorio .....	28
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	36
11.1. Análisis físico químico de arsénico en agua .....	37
11.2. Análisis de la concentración de arsénico de suelo .....	41
11.2.1. Análisis químico de arsénico presente en el suelo.....	41
11.3. Análisis físicos de suelo .....	43

11.4. Interpretación de Análisis estadístico .....	46
11.5. Análisis del mapa de la pluma de contaminación.....	50
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	51
12.1. Conclusiones .....	51
12.2. Recomendaciones .....	52
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados</i> .....	6
<b>Tabla 2.</b> <i>Coordenadas de la zona de estudio</i> .....	22
<b>Tabla 3.</b> <i>Resultados de la caracterización biofísica de la zona de estudio.</i> .....	36
<b>Tabla 4.</b> <i>Parámetros fisicoquímicos del agua</i> .....	38
<b>Tabla 5.</b> <i>Concentración de arsénico en el suelo</i> .....	40

## ÍNDICE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> <i>Mapa de la zona de estudio</i> .....	21
<b>Figura 2.</b> <i>Zona de recolección de muestras</i> .....	22
<b>Figura 3.</b> <i>pH y conductividad eléctrica del suelo</i> .....	41
<b>Figura 4.</b> <i>Textura de suelo</i> .....	42
<b>Figura 5.</b> <i>Porcentaje de humedad del suelo de la zona de muestreo</i> .....	43
<b>Figura 6.</b> <i>Porosidad del suelo</i> .....	44
<b>Figura 7.</b> <i>Relación de parámetros fisicoquímicos</i> .....	46
<b>Figura 8.</b> <i>Pluma de contaminación de arsénico</i> .....	47

## **1. INFORMACIÓN GENERAL**

### **Título del Proyecto:**

“Determinación De Metales Pesados En El Suelo De La Zona Rural De Toacaso, Provincia De Cotopaxi”

### **Fecha De Inicio** Octubre

de 2024

### **Fecha De Finalización**

Marzo de 2025

### **Lugar de ejecución:**

Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Suelo, parroquia Toacaso, cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi.

### **Institución, unidad académica y carrera que auspicia**

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales (CAREN), carrera de Ingeniería en Medio Ambiente.

### **Nombres de equipo de investigación:**

Tutor: Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila

Estudiantes: Srta. Yulisa Nicolle De la Cruz Casco y la Srta. Aracelly Nayeli Guano Caiza

LECTOR 1: Ing. Karina Fonseca

LECTOR 2: Ing. Vladimir Ortiz

LECTOR 3: Ing. José Luis Agreda

### **Área de Conocimiento:**

Ingeniería, industria y construcción, tecnología de protección del medio ambiente y Ciencias Ambientales.

**Línea de investigación:**

Análisis, Conservación y Aprovechamiento de la Biodiversidad Local.

**Sub-línea de Investigación de la Carrera:**

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales.

**Línea de Vinculación de la Facultad:**

Determinación de metales pesados en el suelo de la zona rural de Toacaso, provincia de Cotopaxi

## 2. INTRODUCCIÓN

La presencia del arsénico en el suelo y en las fuentes de agua en Toacaso debido a factores naturales de origen geológico asociado a los afluentes del Páramo de los Ilinizas (Orozco, 2022). Según Imbago & Oña (2019) manifiestan que presenta una elevada contaminación del agua con arsénico llegando a concentraciones de 0.70 ppm. En el año 2017 el MAE (Ministerio del Ambiente Ecuador), realizó el análisis fisicoquímico del agua detectando el incumplimiento del Límite Máximo Permisible de la concentración de As en el agua y también según el Instituto Nacional de Salud Pública (2020) menciona que el agua representa el 80% de la composición de la mayoría de los organismos e interviene masiva y decisivamente en la realización de sus procesos metabólicos; asimismo, desempeña un importante papel en la fotosíntesis de las plantas y sirve de hábitat a una gran parte de los seres vivos.

Según Chavarría (2021) menciona que el suelo es el tanque de almacenamiento de agua, aire y nutrientes del que las plantas los extraen. La capacidad de almacenamiento y disponibilidad de plantas depende de la cantidad disponible y de las características de cada suelo. Por tanto, es necesario comprender cómo se construye el suelo y las fuerzas que actúan sobre la retención y movimiento del agua. De este modo, las características del suelo se pueden mantener, deteriorar o mejorar basándose en una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. El suelo tiene diferentes funciones, entre las que podemos mencionar: es medio de anclaje de las raíces, actúa como depósito de agua para las plantas, por su capacidad de retener agua y hacerla de fácil absorción, nutrientes principales, proporcionar oxígeno a las raíces, proporcionar una temperatura adecuada para la germinación de las semillas y el crecimiento de las raíces (Chavarría, 2021). En general, la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Por eso la presencia de altas concentraciones en el horizonte superior decrece drásticamente en profundidad cuando la contaminación es antrópica. Esto sucede precisamente porque la disponibilidad de un elemento depende también de las características del suelo en donde se encuentra (Gañán & Romero, 2008).

De tal modo la presente investigación tiene como objetivo determinar la concentración de arsénico en los suelos de la zona rural de la parroquia Toacaso, con el fin de evaluar los riesgos asociados a la salud humana y el medio ambiente. Dado que el arsénico en el suelo

puede provenir de procesos naturales o actividades humanas, es crucial cuantificarlo para entender su impacto y definir las medidas de control o reducción necesarias. Como resultado, este estudio proporcionará información valiosa para la gestión ambiental.

### **3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

La parroquia rural de Toacaso enfrenta un riesgo de contaminación por metales pesados debido a las actividades humanas como la agricultura intensiva y posibles descargas ilegales de residuos industriales, por ello, es necesario realizar un análisis urgente de los suelos aledaños al río, ya que mediante la revisión de bibliográfica se ha identificado la presencia de arsénico en los suelos de la zona, lo que plantea preocupaciones ambientales y también para la salud del ser humano. La acumulación de este metal pesado arsénico puede afectar en la fertilidad del suelo, la producción agrícola y también representa un peligro para la población al ingresar en la cadena alimenticia.

### **4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

Las actividades humanas han provocado la pérdida de ecosistemas como suelo, agua, vegetación, afectando la calidad de vida de todo tipo de organismo en el planeta. Según Rojas & Ibarra, (2012) una de las principales causas que afectan al suelo son las actividades agrícolas y la tala de árboles, debido a su gran importancia en el sector económico, sin embargo, dichas actividades se realizan sin un adecuado control provocando suelos infértiles por lo que la relación hombre - ambiente debería tener un balance equitativo que no afecte negativamente al recurso suelo. La contaminación de los suelos por metales pesados actualmente es considerada de gran relevancia por la presencia de concentraciones nocivas (anomalías), lo cual altera negativamente sus características físicas, químicas y biológicas, perdiendo la capacidad de autodepuración en sus horizontes más superficiales (Barrio, 2016). Los metales pesados pueden ser de origen geogénico y antropogénicos. De procedencia geogénica derivan directamente de la roca madre, de actividad volcánica; mientras que los metales pesados antropogénicos tienen su origen en los residuos peligrosos, de actividades industriales, minería e industria agrícola, y residuos sólidos urbanos (Gal & Baena, 2008).

Según la EPA (US Environmental Protection Agency) considera a los metales pesados "elementos metálicos con pesos altos (por ejemplo: mercurio, cromo, cadmio, arsénico y

plomo); pueden ser nocivos a los seres vivientes en pequeñas concentraciones y tienden a acumularse en la cadena alimenticia" (US EPA, 2018). La parroquia rural de Toacaso enfrenta una preocupante situación de contaminación del suelo por metales pesados. Estos elementos tóxicos, como el plomo, mercurio, cadmio y arsénico, pueden tener graves repercusiones en la salud de las personas y en el medio ambiente.

## **5. HIPÓTESIS**

Hipótesis Alternativa: Existe una concentración de arsénico en los suelos de la zona rural de Toacaso que excede el límite permisible establecido por las normativas ambientales.

Hipótesis Nula: No se encontraron evidencias de que la concentración de arsénico en los suelos de la zona rural de Toacaso excedía el límite permisible, ya que los análisis realizados mostraron niveles de arsénico dentro de los parámetros aceptables.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1. Objetivo General**

Determinar la concentración de arsénico en los suelos de la zona rural de la parroquia Toacaso.

### **6.2. Objetivo Específico**

- Caracterizar biofísicamente la zona de estudio en la parroquia de Toacaso mediante fuentes bibliográficas.
- Realizar análisis fisicoquímicos de las muestras colectadas en la zona rural de la parroquia de Toacaso.
- Mapear el transporte de contaminantes en el suelo mediante el software de modelamiento de pluma para evaluar su dispersión.

## 7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

**Tabla 1.** *Actividades y sistema de tareas en relación a los objetivos planteados*

Objetivos	Actividades	Metodología	Resultado
O.1.- Caracterizar • biofísicamente la zona rural • de la parroquia de Toacaso.	Identificación de la zona. Visitas de campo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión bibliográfica</li> <li>• Reconocimiento de la zona, selección de puntos de muestreo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de las fuentes de contaminación.</li> <li>• Identificación de los parámetros biofísicos</li> </ul>
O.2.- Realizar análisis • fisicoquímicos de las muestras colectadas en la zona rural de la parroquia de • Toacaso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recolección de muestras en los puntos designados en la parroquia de Toacaso.</li> <li>Medición de parámetros físicos y químicos in situ como porosidad, humedad, pH, conductividad, textura, color, temperatura, turbidez, sólidos totales y sólidos disueltos)</li> <li>• Cuantificación de arsénico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método exploratorio y muestreo sistemático al azar</li> <li>• Análisis mediante la utilización de equipos de medición cualitativo (multiparametro, espectrofotómetro) M-GO-AM-49/S.M. 3114 B / espectrofotometría de absorción atómica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obtención de datos</li> <li>• cuantitativos y cualitativos</li> </ul>

Objetivos	Actividades	Metodología	Resultado
O.3.- Mapear el transporte de contaminantes en el suelo mediante el software de modelamiento de pluma para evaluar su dispersión	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Identificación de fuentes potenciales de contaminación.</li> <li>● Calibración y validación del modelo.</li> <li>● Simulación de escenarios de contaminación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Selección de un software de modelación adecuado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Análisis e interpretación de resultados.</li> <li>● Mapa de dispersión de contaminantes.</li> </ul>

*Notas:* Elaborado por las autoras, 2024.



## **8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA**

### **8.1. Agua**

#### ***8.1.1. Importancia del agua***

En nuestro planeta, el agua es el componente más común, en la tierra abarca el 75% de su superficie, sin embargo, no toda el agua se halla en condiciones adecuadas para su utilización por parte de los seres humanos. Solo el 2.5% del total corresponde a agua dulce y cerca del doble del agua dulce se halla inmovilizada en glaciares y cubierta por nieves ininterrumpidas. (Fernández, 2012) Esto implica que una tercera parte se ubica en lagos, ríos, arroyos y presas, siendo esta proporción mínima la que podemos emplear con mayor facilidad. Por lo tanto, la Tierra, con sus variadas formas de vida que incluyen a más de 6.000 millones de personas, se encuentra ante una severa crisis de agua. Lo alarmante de esta crisis es su impacto en la vida diaria de las comunidades más desfavorecidas, quienes padecen este gran problema tiene repercusiones en las enfermedades asociadas a esta crisis.

El agua es un recurso natural de importancia nacional y mundial, sin embargo, muchos ríos, lagos, lagunas y océanos ya presentan una contaminación acelerada. Las aguas de Ecuador sufren un grave problema de contaminación; varios factores contribuyen a este problema, como la falta de planificación en el desarrollo industrial y tecnológico, la creciente urbanización, el alto crecimiento de la población y el clima que afectan en gran medida el desarrollo ecológico.

#### ***8.1.2. Metales pesados***

El término metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico que tiene una densidad relativamente alta y puede ser tóxico o venenoso en bajas concentraciones.

Los metales pesados son componentes naturales de la corteza terrestre. No pueden degradarse ni destruirse de forma natural. Algunos metales pesados (como el cobre, el selenio, el zinc) son esenciales para mantener el metabolismo del organismo. Sin embargo, en altas concentraciones pueden causar toxicidad. La intoxicación por metales pesados puede ocurrir si se consume agua contaminada por alguno de estos metales, si hay altas concentraciones de metales pesados en el aire cerca de fuentes de emisión o si se ingieren a través de la cadena

alimentaria como señala (Olmos-Palma, 2022). La razón principal es la contaminación industrial y minera. Otra fuente de contaminación pueden ser los vertederos y los vertidos de aguas residuales. En algunos casos, el agua experimenta un enriquecimiento de metales pesados a medida que fluye a través de acuíferos rodeados de rocas que contienen estos metales.

La contaminación por metales pesados se ha convertido en un problema en aumento, principalmente a causa de las actividades humanas. Una de las fuentes más significativas de esta contaminación proviene de la industria minera, la metalurgia, la agricultura y la industria automotriz, entre otras (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017). Estas operaciones han generado un impacto considerable a nivel global, poniendo en peligro la salud humana y el medio ambiente debido a la elevada toxicidad de ciertos elementos, como el Cadmio (Cd), Plomo (Pb), Arsénico (As), Mercurio (Hg). Es esencial destacar que sus efectos pueden ser extremadamente dañinos para los ecosistemas acuáticos y el medio ambiente, dado que los metales son persistentes, lo que implica que no son generados ni descompuestos.

Los metales pesados presentes en el entorno son sumamente tóxicos cuando se encuentran en concentraciones elevadas, afectando directamente la seguridad alimentaria, la salud pública y el medio ambiente. Estos contaminantes pueden clasificarse en dos categorías: fuentes naturales y fuentes antrópicas (Reyes *et al.*, 2016,).

- **Fuentes naturales:** Estas provienen de procesos biológicos o geológicos (Remache, 2013, p. 4), como las erupciones volcánicas o ciertos minerales.
- **Fuentes antrópicas:** Son aquellas que resultan de las actividades humanas (Remache, 2013, p. 4), tales como la minería, la industria textil, el tratamiento de aguas residuales y la aplicación de fertilizantes.

### ***8.1.3. Los metales pesados presentes en el agua***

#### **8.1.3.1. Cadmio (Cd)**

El cadmio (Cd) es un metal tóxico liberado al ambiente por fuentes naturales y antrópicas (Mero *et al.*, 2019) . Dentro de las fuentes naturales se encuentran la actividad volcánica, los incendios forestales y el transporte por el viento de partículas del suelo. Las

fuentes antrópicas son la minería, el uso de fertilizantes fosfatados, la fundición de metales, la quema de combustibles fósiles, la fabricación de baterías, pigmentos, cemento, y plásticos.

#### **8.1.3.2. Plomo (Pb)**

El plomo es un metal pesado, blando y maleable de color gris azulado. Se encuentra comúnmente en la naturaleza en forma mineral y en la antigüedad se recuperaba como subproducto del proceso de fundición de plata. Según Reyes, *et al.* (2016) indican que El plomo es un metal pesado que se ha utilizado durante muchos años debido a su resistencia a la corrosión, ductibilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. El plomo es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel.

#### **8.1.3.3. Arsénico (As)**

El arsénico en aguas superficiales, el As (V) predomina sobre el As (III) especie de mayor toxicidad. En aguas subterráneas pueden encontrarse ambos estados de oxidación ya que las concentraciones de As (III) y As (V) dependen de la entrada del As al sistema, de las condiciones redox y de la actividad biológica (Reyes, *et al.*, 2016)

#### **8.1.3.4. Mercurio (Hg)**

La presencia de trazas de mercurio en el agua se debe principalmente a causas naturales resultantes de los desechos generados por actividades productivas como la minería y la industria, así como a fenómenos geológicos como la meteorización, la erosión de las rocas y la lixiviación. Es un metal líquido a temperatura ambiente, que además de encontrarse en su estado elemental, se puede hallar como derivados inorgánicos y derivados orgánicos (Reyes, *et al.*, 2016).

### **8.2. Suelo**

#### **8.2.1. Importancia del suelo**

El suelo es un recurso natural fundamental que sustenta la vida vegetal y alberga diversos microorganismos. Es de gran importancia para la agricultura, especialmente en

relación con la fertilidad del suelo. Las plantas obtienen de él los nutrientes minerales esenciales para su desarrollo y crecimiento menciona (Dorota, 2012). Sin embargo, también pueden encontrarse en el suelo otros elementos químicos, como los metales pesados, cuya presencia y posterior absorción por las plantas pueden afectar negativamente su crecimiento y desarrollo, ya que tienden a acumularse y son altamente tóxicos. Una concentración de metales pesados fuera de los valores normales altera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que representa un riesgo para la salud humana y los ecosistemas. Según Ángel Balderas-Plata *et al.*, (2003) dice que algunos de los metales pesados y metaloides más comunes son el arsénico, el cadmio, el cobalto, el cromo, el cobre, el mercurio, el manganeso, el níquel, el plomo, el estaño y el zinc.

La producción de alimentos y biomasa quizá es una de las funciones más evidentes, ya que el suelo es un canalizador y suministro de nutrientes para las plantas. El 95% de la producción mundial de alimentos depende del recurso suelo y un manejo inadecuado ocasiona disminución en el abastecimiento de alimentos. Problemas como: la contaminación, degradación y erosión del suelo propicia el avance de la frontera agrícola en búsqueda de suelos más productivos. La consecuencia directa es la deforestación, con lo cual se irrumpe en los ciclos biogeoquímicos, que son indispensables para disponer de condiciones estables en la Tierra y que se dé la vida misma (Pijal, 2020). La importancia del suelo también radica en los servicios ecológicos que proporciona. El suelo es un potencial sumidero de carbono y participa en los procesos de captación e infiltración de agua. Pero si la contaminación y degradación del suelo se torna acelerada, sin contemplar efectos de mitigación, conlleva a afectar mantos acuíferos que proveen de agua para consumo humano o la reducción de la producción alimenticia (Pijal, 2020)

### ***8.2.2. Metales pesados como agentes contaminantes de los suelos***

Los metales pesados son considerados un grupo de elementos que presentan como características principales su elevada densidad (Facsa Ciclo Integral del Agua, 2017), menciona que los contaminantes que generan mayor preocupación son los metales pesados en una densidad mayor a 5 *gcm*<sup>3</sup>. El suelo se caracteriza por la presencia de minerales de manera natural. Una de las principales problemáticas que existen en áreas urbanas es la contaminación del suelo por diversas actividades antrópicas: específicamente por metales pesados la cual se considera una problemática global dentro de su entorno industrializado.

(Pabón & Benítez, 2023) afirma que el metal pesado se encuentra regularmente en la corteza terrestre y meteorizarse se concentra en los suelos. Por ejemplo, los procesos geológicos naturales como desgastes de cerros y volcanes, dados por el intemperismo y la erosión constituyen una fuente de aportaciones importantes de metales pesados en los suelos.

Una de las características fundamentales del suelo es la capacidad de acumular y concentrar los metales pesados debido a su propiedad intrínseca de la atención lo focalizada en la en la capa superficial la cual es considerada como la parte biológicamente más activa del suelo (Galán Huertos & Romero Baena, 2008). Lo cual hace a dichos elementos contaminantes más accesibles para los cultivos las concentraciones naturales de metales pesados se modifica incrementa por diversas actividades humanas entre las cuales se encuentra la minería, la fundición, producción energética las actividades industriales, el uso de plaguicidas y el vertedero de residuos. Los estudios realizados señalan que la contaminación por metales pesados a nivel de suelo es consecuencia severa de la producción agrícola en las últimas décadas, el resultado de las actividades antrópicas como la minería, actividades industriales, uso indiscriminado de pesticidas, fertilizantes, efluentes industriales y agua de reusó en la agricultura

### **8.2.3. Tipo de suelos**

Según Assan & Gorosito, (2019) menciona que la tasa de infiltración es la velocidad a la que el agua penetra o se filtra en el suelo desde la superficie. Se expresa generalmente en milímetros por hora (mm/h) y depende de varios factores, como el tipo de suelo, la humedad inicial del suelo, la cobertura vegetal, la compactación y el contenido de materia orgánica.

La tasa de infiltración varía ampliamente según el tipo de suelo y las condiciones locales.

- **Arenosos:** Suelos de textura gruesa como los suelos arenosos pueden tener una tasa de infiltración alta, entre 20 y 30 mm/h o más, debido a su mayor porosidad.
- **Limosos:** Los suelos limosos tienen una tasa moderada, generalmente entre 10 y 20 mm/h.
- **Arcillosos:** Los suelos arcillosos, que tienen partículas muy finas, tienden a tener una tasa de infiltración baja, por lo general menor a 5 mm/h.

- **Compactados:** En áreas urbanas o suelos compactados, la infiltración puede ser mucho más baja, en algunos casos menos de 1 mm/h.

### 8.3. Efectos en el ambiente por metales pesados

La contaminación por metales pesados es un problema que ha ido en aumento debido principalmente a actividades antrópicas. Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran la minería, la metalúrgica, la agricultura, los vehículos automotores y el aporte natural en ciertos acuíferos (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017). De acuerdo con Pamela *et al.*, (2014) los efectos son bastantes graves y hablando específicamente, cambia la alcalinidad del suelo, obviamente, depende mucho de la concentración. También contaminan el agua y los cultivos. En estos si es una cantidad excesiva de metales pesados se pueden producir algunas alteraciones en las plantas, también degrada el suelo, lo cual disminuye su productividad, si la contaminación es excesiva, puede llegar a producir desertificación. A nivel de los ríos y lagos, también afecta principalmente la fauna. El problema de la contaminación del medio ambiente por metales pesados es que su efecto es silencioso, no se ve, y cuando nos damos cuenta del daño que producen, ya es tarde y sobre todo que son peligrosos para la salud.

### 8.4. Efectos en el ser humano por metales pesados

El principal mineral del arsénico es el FeAsS (arsenopirita) y se usa en tratamiento de maderas, productos agrícolas (pesticidas, herbicidas) bronceadores de piel, anticorrosivos, vidrio, cerámica, pinturas, pigmentos, medicamentos. En alimentación animal como factor de crecimiento, gases venenosos de uso militar, etc. Los síntomas agudos aparecen de tres a cinco días después de exposición a niveles elevados de arsénico, los síntomas incluyen incoordinación, ataxia, transcurridos unos pocos días cerdos y aves pueden aparecer paralizados, aunque seguirán comiendo y bebiendo, también hay ceguera y eritema cutáneo en animales albinos (Londoño, 2016). Los terneros presentan síntomas gastrointestinales. En humanos la toxicidad crónica con arsénico causa lesiones en piel (queratosis, hiperqueratosis, hiperpigmentación) y lesiones vasculares en sistema nervioso e hígado. Las complicaciones agudas aparecen por exposición a dosis elevadas y pueden ser letales, sus primeros efectos suelen ser fiebre, hepatomegalia, melanosis, arritmia cardíaca, neuropatía periférica, anemia y leucopenia. El arsénico está clasificado en el grupo I de sustancias cancerígenas por la IARC. Los tipos de cáncer afectan la piel (basilioma y carcinoma de células escamosas), pulmón

(carcinoma broncogénico), hemangiosarcoma hepático, linfoma y cáncer de vejiga, riñón y nasofaringe (Londoño, 2016).

### **8.5. Sedimentos**

Casi siempre se consideran los sedimentos como un tipo de contaminantes a causa del proceso natural de erosión. De acuerdo con Ruiz & Romero, (2018) si se generan sedimentos en exceso debido a una modificación de este proceso, se transforman en el agente contaminante más grande en aguas superficiales. Se calcula que los sólidos suspendidos presentes en aguas naturales superan en al menos 700 veces a los sólidos suspendidos derivados de las descargas de drenaje. Se refiere a los reservorios que surgen en la superficie terrestre y en el fondo del mar. La creación de sedimentos se basa en gran medida en las acciones físicas y químicas involucradas en la transición entre la roca y la atmósfera, y entre la roca y el agua.

Los depósitos sedimentarios en los lagos desempeñan una excelente función, ya sea como origen o como almacén de muchos de los nutrientes vitales que participan en el proceso de eutrofización.

La transferencia de nutrientes entre los sedimentos y el agua subterránea se basa en las propiedades químicas tanto del agua como del sedimento. Este espacio ecosistémico funciona como una reserva de nutrientes para la columna de agua, ya que, por un lado, contrarresta los incrementos de nutrientes en el medio derivados de las aportaciones directas y/o de la degradación de materia orgánica, reteniendo una porción de estos de acuerdo con (Ramírez , 2017) . En cambio, el déficit es la escasez de nutrientes en etapas de alta necesidad biológica, liberando una porción de estas formas retenidas. Adicionalmente, la energía externa presente en el entorno o en el sistema se manifiesta en las propiedades del sedimento; por lo tanto, la composición de los materiales de procedencia alóctona o autóctona y la rapidez con que se acumulan refleja la actividad del lago como recipiente de una cuenca y como núcleo de actividad biológica.

### **8.6. Clasificación de los sedimentos**

Los sedimentos generalmente son clasificados de la siguiente manera:

**a) Sedimentos de origen clástico (Litogénico)**

Estos sedimentos se generan debido a la descomposición de rocas ya existentes y a las erupciones volcánicas. Se llevan ríos, glaciares y viento. La clasificación se fundamenta en la magnitud del grano (grava, arena, limo, arcilla). Se emplean clasificadores adicionales basándose en la procedencia de los componentes clásicos, así como en su estructura y el tono de los depósitos.

**b) Sedimentos de origen biológico (Biogénico)**

Son derivados de los residuos de seres vivos, componentes carbonatados, ópalo y fosfato de calcio. Estos sedimentos se encuentran en el lugar de deposición a través de lluvias en el lugar o a través de columnas de agua. Son trasladados a otras ubicaciones a través de olas y corrientes acuáticas. La denominación se fundamenta tanto en el tipo de organismo como en su composición química. Las características adicionales incluyen la estructura, el color, el tamaño o la materia añadida.

**c) Sedimentos de origen químico (Hidrogénicos)**

Se trata de precipitaciones producidas a partir del agua marina o del agua intersticial. Además, son modificaciones generadas a través de reacciones químicas en los depósitos sedimentarios. Su denominación se fundamenta en su procedencia y en su composición química. Generalmente, el clasificador adicional es la estructura y el color.

## **8.7. Pluma de contaminación**

Se define como la dispersión de un contaminante en sectores o áreas determinados, estos contaminantes pueden expandirse, mantenerse estables o reducirse, estos procesos dependen de las características físicas, químicas y biológicas que presenten las zonas afectadas (Jiménez, 2020). Actualmente se realizan seguimiento a las plumas de contaminación, este proceso permite dar seguimiento a avances de la remediación o el derrame de acuerdo se observen cambios en el tamaño aparente de la concentración del contaminante.

### **8.7.1. Caracterización de las plumas contaminantes**

Según Jiménez (2020) menciona que los estudios apuntan a que las plumas contaminantes sufren variaciones en el tiempo, como consecuencia de las múltiples variables del medio y sus procesos. El resultado de estos modelos geofísicos es satisfactoriamente compatible con los análisis químicos de laboratorio complementarios. Se ha determinado que

para la caracterización de las plumas contaminantes hay que tomar en cuenta los siguientes aspectos las alteraciones en las mediciones pueden ser causadas por:

A nivel capilar por el recorrido y avance del agua.

- Variaciones de porosidad cercanos a la zona vadosa porque las sustancias llenan los poros. - Procesos de reacción que ocurren entre los productos de la degradación microbiana y la fase sólida del acuífero.
- Por la distribución, saturación y espesor de los residuos que ocurren sobre el nivel freático.
- La degradación microbiana causa alteraciones de los fluidos y su química en los espacios porosos.
- Dirección y cantidad de sustancia de la pluma en su viaje por el acuífero superior

### *8.7.2. Ciclo de vida de las plumas de contaminación*

#### **Etapa del ciclo de vida de las plumas contaminantes**

Según Munro, (2020) menciona que esta tiene 4 etapas:

- **Expansión** El flujo de la masa de contaminantes excede la capacidad de asimilación del acuífero
- **Estable** Procesos de remediación que controlan la longitud de la pluma de contaminación
- **Decadencia** Los procesos de remediación reducen en gran cantidad la longitud de la pluma
- **Exhausta** Baja concentración de los contaminantes de la pluma, los contaminantes se encuentran en dilución.

### *8.7.3. Simulación de contaminantes*

Algunos especialistas han logrado predecir el movimiento y la evolución de las concentraciones de sustancias emitidas por diversas fuentes de contaminación. Los modelos

utilizados para las simulaciones son herramientas clave que facilitan la evaluación del impacto de las actividades humanas sobre los elementos naturales, lo que permite determinar los efectos en el medio ambiente (Carlos, 2018). Sin embargo, realizar una modelación adecuada del transporte de contaminantes en los acuíferos puede ser problemático debido a la escala de trabajo. Según Carrera y otros, la dispersión de los contaminantes puede variar según el tamaño de los poros del suelo y la escala del análisis; por ejemplo, en el campo la escala puede ser de kilómetros, mientras que en la simulación se mide en centímetros (Gómez, *et al.*, 2016).

### **Transporte de contaminantes**

Los factores que gobiernan la migración de un contaminante se consideran en términos de procesos de transporte y procesos de atenuación. Los procesos de transporte pueden representarse matemáticamente por ecuaciones fundamentadas en las leyes de flujo de agua, las cuales, si se combinan en una ecuación de balance de masas con aquellos procesos que causan la atenuación del contaminante, proporcionan la ecuación diferencial general que gobierna la migración de contaminantes (Chamorro & López, 2016).

Procesos de transporte: Los procesos básicos de transporte de contaminantes son: a) advección, y b) dispersión. Según (Chamorro & López, 2016) tienen los siguientes conceptos.

Advección es el movimiento del contaminante con el flujo del agua. Dispersión es la mezcla aparente y difusión del contaminante dentro del sistema de flujo.

La masa de contaminante fluye dentro del tubo con una velocidad constante  $V$ . Este proceso de transporte es el denominado advección. Mientras la masa se mueve, también se disgrega en el agua, entonces el contaminante empieza a ocupar un espacio creciente dentro del tubo, por lo tanto, decrece en concentración con el tiempo. Este proceso se llama dispersión.

### **8.8. Ley de Darcy**

Según Byjus (2025) menciona que la ley de Darcy establece el principio que rige el movimiento de un fluido en una sustancia dada. La ecuación de la ley de Darcy describe la capacidad del líquido de fluir a través de cualquier medio poroso como una roca. La ley se basa en el hecho de que, según él, el flujo entre dos puntos es directamente proporcional a las

diferencias de presión entre los puntos, la distancia y la conectividad del flujo dentro de las rocas entre los puntos. La medición de la interconectividad se conoce como permeabilidad.

### **8.9. Ley de Fick**

La ley de Fick es una ley cuantitativa en forma de ecuación diferencial que describe diversos casos de difusión de materia en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. Este flujo irá en el sentido opuesto del gradiente y si éste es débil, podrá aproximarse por el primer término de la serie de Taylor, resultando la ley de Fick (Agudelo & Franco, 2009).

### **8.10. Software MODFLOW 6**

Los programas como Visual Modflow simulan los mecanismos de transporte de contaminantes empleando una técnica denominada "tracking" o seguimiento de partículas, basada en la representación del movimiento del contaminante en el agua por intermedio de partículas que actúan a manera de trazadores, simulando la trayectoria de desplazamiento del contaminante a través del tiempo. El proceso consiste en la asignación de un número de partículas trazadoras en un punto específico, que puede bien ser la fuente de contaminación o el sitio de detección del agente estudiado (Maldonado, 2019).

## **9. MARCO LEGAL**

El presente estudio sobre la contaminación del suelo por metales pesados en la parroquia de Toacaso se sustenta en el marco legal vigente en Ecuador, el cual establece normativas para la protección del medio ambiente y la gestión sostenible de los recursos naturales.

### **1. Constitución de la República del Ecuador (2008)**

La Constitución ecuatoriana establece principios fundamentales para la protección del medio ambiente, destacando lo siguiente:

- **Artículo 14:** Reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, garantizando la sostenibilidad y el buen vivir (*Sumak*

*Kawsay*). Declara de interés público la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la prevención del daño ambiental.

- **Artículo 15:** Establece la prohibición del uso de tecnologías y sustancias tóxicas que puedan afectar el medio ambiente y la salud humana.
- **Artículo 395:** Define la política ambiental del Estado basada en la prevención de la contaminación y en la gestión sustentable de los recursos naturales.
- **Artículo 396:** Determina que el Estado adoptará medidas para prevenir, mitigar y reparar los efectos de la contaminación ambiental, con responsabilidad sobre quienes la generen.

## 2. Ley de Gestión Ambiental (1999)

La Ley de Gestión Ambiental establece las disposiciones para la conservación, protección y uso sostenible de los recursos naturales en Ecuador. Entre sus principales artículos relevantes para el estudio destacan:

- **Artículo 19:** Obliga a todas las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, a prevenir y mitigar los efectos ambientales negativos derivados de sus actividades.
- **Artículo 20:** Establece que toda actividad que pueda generar impacto ambiental debe contar con un estudio de impacto ambiental y cumplir con medidas de remediación.
- **Artículo 21:** Determina la obligación de los municipios y gobiernos autónomos de establecer regulaciones locales para la protección del suelo y el agua.
- **Artículo 22:** Regula el uso de sustancias peligrosas en actividades industriales y agrícolas, estableciendo restricciones y controles para evitar la contaminación del suelo y agua.

## 3. Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2017)

El **TULSMA** establece parámetros de calidad ambiental del suelo y criterios de remediación para suelos contaminados. Sus disposiciones incluyen:

- Definición de **límites permisibles** de contaminantes en función del uso del suelo.
- Métodos y procedimientos para la evaluación de la calidad del suelo y su monitoreo.

- Parámetros de calidad ambiental para distintos tipos de suelo, estableciendo un límite permisible de **arsénico de 12 mg/kg** para suelos agrícolas y urbanos.
- Procedimientos para la **remediación de suelos contaminados**, determinando las acciones necesarias en caso de contaminación que supere los niveles establecidos.
- **Normativa sobre responsabilidad ambiental**, exigiendo que quienes generen contaminación sean responsables de la remediación de los daños causados.

#### 4. Normativa sobre Calidad del Agua

El Ecuador también cuenta con regulaciones específicas para la calidad del agua, aplicables al análisis de metales pesados en cuerpos de agua cercanos a áreas agrícolas e industriales. Entre ellas destacan:

- **Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2014**: Establece los criterios de calidad del agua para consumo humano, con un límite máximo permisible de **0.01 mg/L de arsénico**.
- **Reglamento Ambiental para Actividades Agropecuarias**: Prohíbe el uso de plaguicidas y fertilizantes con concentraciones elevadas de metales pesados que puedan contaminar el agua y el suelo.
- **Norma INEN 2176:2013**: Regula la calidad del agua para riego agrícola y establece límites de metales pesados permitidos para evitar la contaminación del suelo.

#### 5. Código Orgánico del Ambiente (2018)

El Código Orgánico del Ambiente refuerza el marco normativo ambiental en Ecuador, estableciendo regulaciones específicas para la protección de suelos y cuerpos de agua:

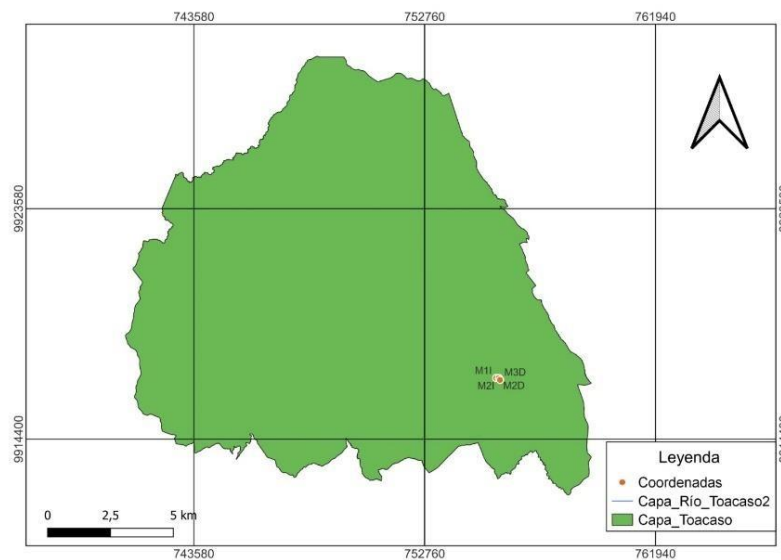
- **Artículo 56**: Define los niveles de contaminación del suelo y sus efectos en la biodiversidad.
- **Artículo 74**: Establece la responsabilidad de los gobiernos locales en la gestión y control de la contaminación de suelos.
- **Artículo 138**: Regula las actividades industriales y agropecuarias para prevenir la contaminación por metales pesados.

- **Artículo 145:** Obliga a las empresas que generan residuos peligrosos a implementar planes de mitigación y remediación ambiental.

## 10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### 10.1. Área de Estudio

El presente proyecto de investigación se ejecuta en la parroquia rural de Toacaso, este se encuentra ubicado en la parte noroccidente del cantón Latacunga, en las faldas de los Ilinizas. La población actual de Toacaso es de aproximadamente 8.000 habitantes, el índice de la población indígena es del orden del 35% y cuenta con 35 barrios o comunidades (**Figura 1**).



**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio

### 10.2. Coordenadas de la zona de estudio

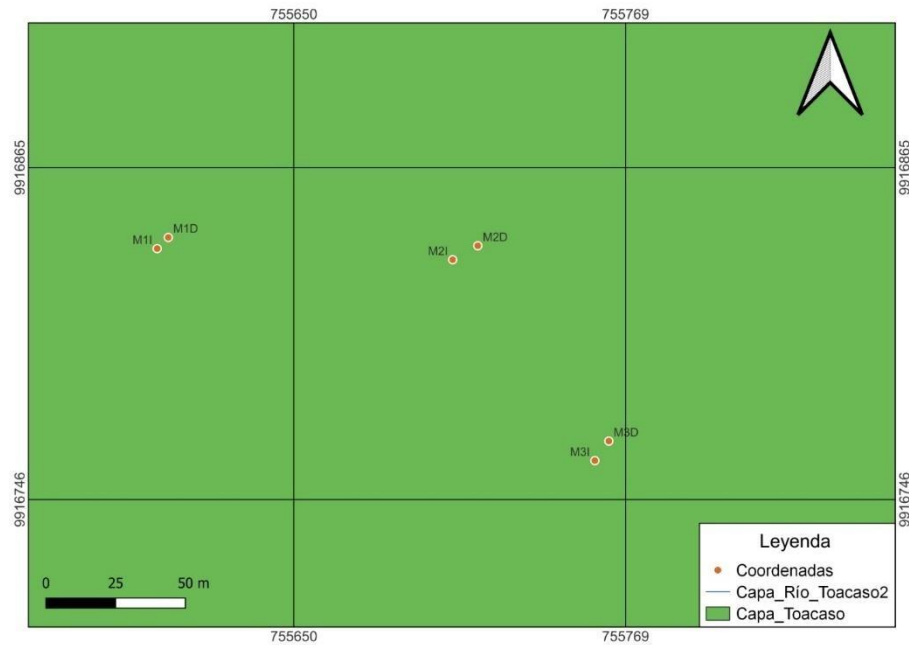
Se ubicaron los puntos de muestreo con coordenadas geográficas para su identificación y análisis. La siguiente tabla muestra sus coordenadas (X, Y).

**Tabla 2.**

*Coordenadas de la zona de estudio*

Puntos	X	Y
M1D	755605.00	9916840.00

<b>M1I</b>	755601.00	9916836.00
<b>M2D</b>	755716.00	9916837.00
<b>M2I</b>	755707.00	9916832.00
<b>M3D</b>	755763.00	9916767.00
<b>M3I</b>	755758.00	9916760.00



**Figura 2.** Zona de recolección de muestras

**Nota;** Para facilitar la identificación de las muestras se utilizaron las siguientes abreviaturas: M1I para la Muestra 1 Izquierda y M1D para la Muestra 1 Derecha. Estas muestras fueron seleccionadas en tres puntos diferentes para evaluar la variabilidad en la composición del suelo en ambos lados del río.

### 10.3. Componentes Biofísico de la parroquia de Toacaso

Según el Gad Parroquial de Toacaso, (2013) menciona que el clima, temperatura y la precipitación tienen las siguientes características:

- **Agua.**

Por el incremento de la población en áreas urbanas, rurales y fronteras agrícolas concentradas se está produciendo mayor contaminación a los recursos hídricos, ya que, al

focalizarse la concentración poblacional, la producción de los desechos se incrementa en volúmenes localizados, que se vierten o depositan en las quebradas de afluentes del agua. La producción agropecuaria también aporta en la contaminación del agua. Los focos de contaminación de las aguas son las poblaciones que botan los desechos en los cause de ríos, el uso de los agros tóxicos, que por lixiviación o al verter directamente en los afluentes contaminan las aguas y los vertederos de aguas servidas domiciliaria. (Gad Parroquial de Toacaso, 2013).

- **Clima**

El clima de la Parroquia tiene pocas variantes, principalmente determinadas por la altitud, la influencia de los vientos cálidos del trópico y la proximidad al nevado Los Ilinizas.

- **Temperatura.**

En general las temperaturas promedio oscilan entre los 6°C a 12°C. Dentro de la clasificación de formaciones bioclimáticas, el área de Toacaso le corresponde a la Ecuatorial de Alta Montaña y nivel. A nivel micro podemos determinar 5 niveles, con rango de temperatura diferenciada en 2 grados en cada nivel. Debemos tomar en cuenta que por el cambio climático las temperaturas han variado en diferentes zonas de la parroquia (Gad Parroquial de Toacaso, 2013).

- **Precipitación.**

Encontramos dos zonas definidas y divididas por la cordillera occidental. La parte que corresponde y se dirige a los valles andinos, en donde la precipitación oscila entre los 500 a 750 mililitros anuales y a la zona que se encuentra en el flanco occidental de la cordillera en mención, que se dirige hacia el trópico del Ecuador, con precipitaciones mayores en comparación a la zona del flanco oriental de la cordillera, un promedio de 750 a 1000 mililitros anuales. Las mayores precipitaciones anuales, están dadas por la presencia de vientos calientes que vienen desde el trópico y la presencia de la niebla que se condensa para producir las precipitaciones (Gad Parroquial de Toacaso, 2013).

- **Altitud**

En lo referente a la altitud, el territorio de la parroquia Toacaso, se encuentra sobre los 2.680 msnm y supera los 4.000 msnm, en la cordillera, y la cota máxima del nevado los Ilinizas es de 5.248 msnm.

- **Geología.**

El suelo de la Parroquia se asienta sobre la Placa Sudamericana y acorde a sus Facies distales, considerados como cuerpos sedimentarios con características homogéneas que pueden ser definidos y separados de otros por su geometría, litología, estructuras

## **10.4. Enfoques**

### ***10.4.1. Enfoque Descriptivo***

La presente investigación adoptó un enfoque descriptivo con el objetivo de evaluar la calidad del suelo en la zona rural de Toacaso. Se llevó a cabo la identificación y análisis de los metales pesados presentes en el suelo, así como la documentación de las condiciones ambientales de la región. Este enfoque permitió establecer una base sólida para comprender el estado del suelo y sus implicaciones en el entorno local.

### ***10.4.2. Enfoque Cuantitativo***

La investigación también incorporó un enfoque cuantitativo para evaluar de manera precisa la calidad del suelo en la zona rural de Toacaso, centrándose en la detección de arsénico. Se realizaron mediciones específicas de los niveles de arsénico en muestras de suelo, utilizando técnicas analíticas como la espectrometría de absorción atómica. Estos datos cuantitativos permitieron establecer la concentración de arsénico y su relación con las condiciones ambientales del área. Este enfoque proporcionó una base sólida para comprender la magnitud de la contaminación por arsénico y sus posibles implicaciones para la salud pública y el ecosistema local.

## **10.5. Técnicas**

### ***10.5.1. Muestreo sistemático al azar***

El muestreo sistemático al azar combinó el muestreo aleatorio con un patrón sistemático. Se inició con la selección de un punto al azar dentro del área de estudio y se establecieron intervalos regulares entre cada muestra, lo que aseguró una distribución uniforme y representativa. Se eligió este método porque permitió obtener una muestra representativa del área de estudio, garantizando una distribución equitativa de los puntos de muestreo. Esta estrategia fue fundamental para la investigación, ya que facilitó la evaluación precisa de la calidad del suelo y la detección de arsénico, contribuyendo así a la validez de los resultados obtenidos.

## **10.6. Métodos**

### ***10.6.1. Fase de campo***

#### **10.6.1.1. Metodología de recolección de muestras de suelo y agua**

La toma de muestras se llevó a cabo siguiendo protocolos y estándares métodos y técnicas establecidas, en este caso se siguió la NTE INEN 2169 (2013) para obtener una muestra representativa del caudal y del suelo. Para recolectar las muestras, se tomaron primero tres muestras de agua: una del río Pucahuaico, otra del río Blanco y la tercera en el punto donde se unen ambos ríos. Posteriormente, se recolectaron seis muestras de suelo una en el lado derecho y otra del lado izquierdo.

Se preparó el equipo adecuado, como recipientes limpios, para evitar la contaminación cruzada. En cada punto seleccionado, se tomará una muestra de suelo a la profundidad especificada (generalmente de 0 a 15 cm), recolectando alrededor de 500 gramos. Cada muestra se colocará en una bolsa etiquetada que incluye la fecha y el número del punto de muestreo, mientras se registra toda la información relevante, asegurando así un proceso organizado y sistemático.

Se realizó una repetición de una vez al mes del proceso de muestreo de suelo, donde se tomarán tres muestras en ubicaciones estratégicas: una cerca del río, donde se espera una mayor influencia de contaminantes; una segunda muestra en un punto intermedio, a una distancia

moderada del río, para evaluar la variación en la concentración de contaminantes; y una tercera muestra en un lugar más alejado, que servirá como control para comparar los niveles de contaminación. Este enfoque sistemático permitirá obtener datos valiosos para analizar tendencias en la contaminación del suelo

Se detalla el procedimiento seguido para la toma de muestras de suelo y agua, así como las medidas de conservación empleadas para garantizar la integridad de las muestras hasta su análisis en laboratorio.

### **Materiales Utilizados**

- Cuaderno de notas
- Fundas zipper
- 1 pala
- 3 botellas ámbar
- 2 cooler
- GPS
- Marcador
- Báscula de mano

### **Tipos De Recipientes**

Para la recolección de muestras de agua, se emplearon botellas de vidrio ámbar de un litro, material óptimo para preservar la integridad de compuestos sensibles a la radiación ultravioleta. En el caso de las muestras de suelo, se utilizaron bolsas de plástico de alta densidad, prácticas para su manejo y transporte en campo.

### **Preparación de los Recipientes**

Las botellas de vidrio ámbar se lavaron exhaustivamente con detergente y enjuagaron con agua destilada. Se enjuagaron nuevamente con una pequeña cantidad de agua destilada para eliminar cualquier residuo de detergente. Se dejaron secar al aire libre y las fundas de zipper se verificaron que estuvieran limpias y sin perforaciones.

## **Procedimiento de Muestreo**

Se seleccionaron puntos representativos tanto para el suelo como para el agua, considerando factores como la vegetación y posibles fuentes de contaminación.

### **Toma de muestras de suelo**

Se utilizaron fundas de zipper para recolectar aproximadamente 500 gramos de suelo en cada punto de muestreo. Con ayuda de una pala para cavar aprox. 30cm de profundidad.

Se evitó contaminar las muestras con material orgánico en descomposición o restos de vegetación.

#### Toma de muestras de agua

Se llenaron las botellas de vidrio ámbar directamente de la fuente de agua, evitando tocar la boca de la botella con los dedos.

Se llenaron las botellas hasta el cuello, dejando un pequeño espacio para evitar la expansión del líquido por cambios de temperatura.

## **Rotulado**

Se etiquetó cada muestra con un marcador indeleble, indicando: Número de muestra, fecha y hora de toma, ubicación exacta (coordenadas GPS si es posible), tipo de muestra (suelo o agua), nombre del propietario.

## **Conservación de las muestras y transporte**

Se colocaron las muestras de suelo en bolsas de plástico selladas y transferidas a un cooler para su almacenamiento. Se colocaron botellas de agua pre etiquetado en hieleras llenas de hielo para mantener una temperatura constante cercana a los 4°C durante el transporte al laboratorio.

### ***10.6.2. Fase de laboratorio***

#### **10.6.2.1. Metodología de laboratorio en agua**

## **Espectrofotometría de absorción atómica**

La espectrofotometría de absorción atómica es una técnica analítica que se usa para medir la cantidad de elementos metálicos presentes en una muestra. Se basa en la medición de la radiación electromagnética absorbida por los átomos del elemento de interés. Al hacer pasar un haz de luz a través de la muestra, se puede determinar la concentración del elemento mediante una curva de calibración. Esta técnica es muy útil en diversas áreas, como la industria alimentaria, la agricultura, la minería y la investigación ambiental (Sanmiguel & Guerrero, 2017).

## **pH**

### **Materiales**

- pH-metro (multiparametro)
- Vaso de precipitados
- Agua destilada
- Muestras de agua

### **Procedimiento**

1. Calibración del pH-metro: Enjuaga el electrodo con agua destilada, luego calibra el pHmetro
2. Preparación de la muestra: Coloca la muestra de agua en un vaso de precipitados limpio.
3. Medición del pH: Introduce el electrodo del pH-metro en la muestra.
4. Limpieza: Limpia el electrodo con agua destilada después de cada medición.

### **Temperatura y turbidez**

### **Materiales y Equipos**

- Multiparámetro Recipientes limpios con muestras de agua.
- Paño seco (para limpiar el equipo).

- Agua destilada (para enjuagar la sonda).

## **Procedimiento**

### **Medición de Temperatura**

1. Encender el multiparámetro y seleccionar la opción de temperatura.
2. Sumergir la sonda en la muestra de agua.
3. Esperar unos segundos hasta que la lectura se estabilice.
4. Registrar el valor mostrado en la pantalla ( $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{F}$ ).

### **Medición de Turbidez**

1. Llenar un tubo de vidrio con la muestra de agua, evitando burbujas.
2. Limpiar el exterior del tubo con un paño seco.
3. Colocar el tubo en el sensor de turbidez del multiparámetro.
4. Leer el valor en la pantalla en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

### **Color y dureza**

#### **Materiales**

- Espectrofotómetro
- Celdas o cubetas de vidrio
- Muestras de agua
- Agua destilada
- Pipetas y frascos para muestras

#### **Procedimiento para color**

1. Preparación de muestras: Recoge las muestras de agua en frascos limpios, asegurándose de que no haya burbujas de aire ni partículas en suspensión.
2. Calibración del Equipo: Calibrar el espectrofotómetro utilizando agua destilada como blanco.

3. Medición del color: Introduce la muestra de agua en la celda de vidrio. Inserta la celda en el espectrofotómetro y mide la absorbancia o el color a la longitud de onda estándar.

### **Procedimiento para dureza**

1. Preparación de muestras: Recoge las muestras de agua en frascos limpios, asegurándose de que no haya burbujas de aire ni partículas en suspensión.
2. Calibración del Equipo: Calibrar el espectrofotómetro utilizando agua destilada como blanco.
3. Medición de la dureza: se coloca la muestra en la cubeta para colocar en el espectrofotómetro y se mide la absorbancia.

#### **10.6.2.2. Metodología de laboratorio en suelo**

### **Textura**

Se utilizó el método de Bouyoucos, una técnica eficaz para determinar la textura del suelo. El método del Bouyoucos emplea un hidrómetro. Este instrumento mide la disminución de la densidad de la suspensión debido al asentamiento de las partículas del suelo. Un pretratamiento es necesario para separar o dispersar los agregados del suelo en las partículas principales de arena, limo y arcilla (Erazo, 2019). En este procedimiento se usa una solución química como un dispersante. Este método, permitirá tener una adecuada información cuantitativa sobre los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. Las partículas suspendidas en el agua se asientan diferencialmente.

### **Humedad**

#### **Método gravimétrico**

El método gravimétrico es el más exacto para medir el contenido de humedad del suelo y resulta necesario para calibrar el equipo utilizado en los demás métodos. Para determinada humedad se utilizó los siguientes materiales.

## **Materiales y equipo**

- Suelo húmedo tamizado en malla de 2 mm (300g /horizonte)
- Estufa
- Balanza
- Cápsula metálica o recipientes de vidrio apropiados □ Papel aluminio e identificadores.

## **Procedimiento**

1. Tamizar la muestra de suelo y ponerle airear con 24 horas de anticipación para eliminar piedras y otros materiales grandes.
2. Pesamos la tierra seca, colocamos la tierra seca en el recipiente y pésala. Agregamos agua con la pipeta, agregamos un poco de agua a la tierra solo lo suficiente para que esté húmeda.
3. Pesar la cápsula metálica vacía, posteriormente se pesa con el suelo húmedo y llévela a la estufa a una temperatura de 105°C durante 2 o 3 horas.
4. Pesamos la tierra seca una vez que la tierra esté completamente seca, sácala del horno y déjala enfriar un poco. Volver a pesar la tierra seca. Anotamos este nuevo peso.
5. Sacar nuevamente la cápsula, dejarla enfriar, pesarla, y si el peso no es constante repita la operación hasta obtenerlo.

## **pH y conductividad de suelo**

### **Calibración del pH metro**

Para la calibración del pH metro es necesario conocer el tipo de pH metro que va a ser utilizado, para dicha actividad de conocer el rango de pH de una muestra es necesario calibrar.

- Lo primero es mantener el pH metro funcionando por lo menos unos 30 minutos.
- Después se procede a limpiar los electrodos con agua destilada.
- Una vez limpios se procede a introducir en las soluciones tampones de pH 7.02 y 4 hasta que de un rango constante.

### **Preparación de la muestra**

- En el lugar procedente a obtenerla muestra, limpiamos con la ayuda de una pala los residuos presentes y procedemos a introducir la misma en el suelo.
- Tomar una muestra de la capa arable del suelo en una profundidad de 20 cm.
- Dejar secar la muestra durante 48 horas a temperatura ambiente.
- La preparación de la muestra de suelo es uno de los pasos importantes para medir el pH, ya que al no ser realizada correctamente se pueden generar lecturas inconsistentes al momento de medir el pH.

### **Procedimiento**

- Pesar 10 g de suelo seco al aire, después se procede a tamizar, (tamiz de 2mm).
- Una vez tamizado introducir la muestra en un vaso de precipitación de 50 ml.
- Después se procede añadir 25 ml de agua destilada.
- Una vez añadida el agua agite la suspensión durante 5 minutos y deje reposar durante 30 minutos para de esta manera lograr el equilibrio iónico.
- Antes y después de cada una de las lecturas se debe lavar y secar el electrodo con la ayuda del agua destilada y papel de filtro.
- Con el pH metro ya calibrado, una vez ya transcurridos los 30 minutos procedemos
- Al introducir el electrodo, accionamos el pH metro y el rango que sea constante será el valor de la solución.

### **Porosidad mediante densidad aparente y densidad real**

En este caso, para determinar la porosidad, medimos la porosidad del suelo utilizando los métodos de densidad real ( $D_r$ ) y densidad aparente ( $D_a$ ). La porosidad del suelo es la proporción de huecos o poros en relación con el volumen total del suelo. Estos poros pueden contener agua, aire o ambos. La porosidad del suelo es un factor importante para determinar su capacidad para retener agua y moverse, así como para proporcionar aireación y espacio para el crecimiento de las raíces de las plantas (Cueto *et al.*, 2008).

- Se puede calcular indirectamente, a partir de los valores de ( $D_r$ ) y ( $D_a$ )

**Fórmula**  $P_o = \frac{D_r}{D_a} - 1 \times 100\%$  (1)

*Dr*

**Donde:**

**Dr** = Densidad real

**Da** = Densidad aparente

**Pluma de contaminación**

**10.6.2.3. Metodología para la simulación de la pluma de contaminación en Arsénico**

Para simular la propagación de la contaminación de suelo, se utilizó el software Modflow este, está diseñado para modelar el flujo de agua subterránea y la dispersión de contaminantes en medios porosos, lo que lo convirtió en la herramienta ideal para este análisis de contaminación del suelo.

La simulación se llevó a cabo en múltiples etapas. Primero, se recopiló información detallada sobre las características del suelo en el área de estudio, como la textura, la estructura, la conductividad hidráulica y la porosidad. También se identificaron las fuentes de contaminación y se evaluaron las condiciones ambientales que podrían afectar la dispersión de la pluma.

**Transporte del contaminante**

Según (Chamorro & López, 2016) un trabajo desarrollado en 2008 por Mirbagheri y Kazemi, proporciona un modelo matemático unidimensional basado en la ecuación de convección dispersión en medios porosos no saturados, para calcular la concentración de sólidos totales inorgánicos dentro del relleno. El modelo numérico está fundamentado en el método del elemento finito. El término “Source” o fuente del contaminante que interviene en la ecuación mencionada, se basa en el modelo de generación de lixiviados propuesto por Straub y Lynch (1982) para sólidos totales inorgánicos. Según este trabajo, la ecuación diferencial que controla el transporte del contaminante a través del relleno, en la cual no se considera la degradación y se desprecia la mezcla debido a la difusión molecular, es:

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} + \frac{\partial(qc)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = ac$$

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\theta D_h(\theta))_{az} + \theta R \quad (1) \quad R = K$$

$$S (Cst - C) \quad (2)$$

So

$$D_h(\theta) = \lambda |\theta| \quad (3)$$

$$\theta_c = 1 - \frac{2}{b_1} + b_2 \theta b^s \quad (4)$$

donde: C = concentración de la fase fluida [M/V<sup>3</sup>]; Dh = coeficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal [L<sup>2</sup>/T];  $\square$  = dispersividad [L]; K' = Coeficiente de tasa [1/T]; S = masa por volumen de residuo disponible para transferir en un tiempo t [M/T<sup>3</sup>]; So = masa por volumen de residuo disponible para transferir en un tiempo t = 0 [M/T<sup>3</sup>]; Cst = concentración máxima de contaminante en la fase líquida; y  $\theta_s$  = contenido de agua [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>].

### Ley de Darcy

La ley de Darcy establece que el flujo de agua a través de un medio poroso es directamente proporcional a la diferencia de presión a través del medio e inversamente proporcional a su resistencia al flujo (llamada viscosidad del fluido) (Instituto del agua, 2025). Su ecuación básica se expresa de la siguiente manera:

$$Q = K i A \quad (5)$$

Aquí, Q es el caudal (la cantidad de agua por unidad de tiempo), K es la conductividad hidráulica (una medida de la capacidad del suelo para transportar agua), i es el gradiente hidráulico (la relación entre la diferencia de altura y la distancia horizontal) y A es el área de la sección transversal a través de la cual fluye el agua.

En este estudio, la ley de Darcy se aplicó para simular cómo el agua subterránea se desplaza a través del suelo y traslada sustancias contaminantes, como el arsénico, desde el foco de contaminación hacia otras zonas.

### Ley de Fick

La primera ley de Fick es usada para describir la densidad de flujo debido a difusión turbulenta (y también para difusión molecular), y se expresa;

$$J = DC/L \quad (6)$$

En la ecuación 6 se presenta  $J = D \left( \frac{dc}{dx} \right) J$ , donde J: densidad de flujo  $[M/L^2T]$ , D: coeficiente de transporte de masa de Fick  $[L^2/T]$ , C: concentración del elemento o compuesto químico  $[M/L^3]$  y x: distancia sobre la cual se consideran cambios en la concentración  $[L]$ . Esta ley se aplicó para modelar cómo el arsénico se difunde a través del suelo, permitiendo simular la extensión y el comportamiento de la pluma de contaminación a lo largo del tiempo (Oyarzún, 2007).

### **Integración de leyes en MODFLOW**

Cuando se utiliza MODFLOW, se integran las leyes de Darcy y Fick. MODFLOW utiliza la Ley de Darcy para modelar el flujo de agua subterránea y cómo ese flujo transporta el arsénico, mientras que la Ley de Fick se utiliza para modelar la difusión de contaminantes a través del suelo. Esta integración permite una representación más precisa de cómo se comportan las columnas de contaminación en el tiempo y el espacio.

## **11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Para alcanzar el primer objetivo, se llevó a cabo una investigación bibliográfica exhaustiva. Esta investigación proporcionó valiosa información sobre las características biofísicas de la zona, lo que permitió obtener una visión completa y detallada del área de estudio.

**Tabla 3.** *Resultados de la caracterización biofísica de la zona de estudio.*

<b>Componentes</b>	<b>Detalles</b>
<b>Biofísico</b>	

<b>Agua</b>	El crecimiento poblacional en áreas urbanas, rurales y agrícolas ha incrementado la contaminación del recurso hídrico. Las principales fuentes de contaminación incluyen el vertido de desechos en quebradas y ríos, el uso de agroquímicos que se infiltran en el suelo o llegan directamente a los afluentes, y los vertederos de aguas servidas domiciliarias.
<b>Clima</b>	Caracterizado por pocas variaciones debido a la altitud, la influencia de los vientos cálidos del trópico y la proximidad al nevado Los Ilinizas.
<b>Temperatura</b>	Rango promedio entre 6°C y 12°C. Clasificación bioclimática: Ecuatorial de Alta Montaña. Se identifican cinco niveles microclimáticos con variaciones de 2°C entre cada uno. El cambio climático ha provocado fluctuaciones térmicas en distintas zonas de la parroquia.
<b>Precipitación</b>	Dos zonas diferenciadas por la cordillera occidental: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona oriental (valles andinos): 500 - 750 mm anuales.</li> <li>• Zona occidental (influencia tropical): 750 - 1000 mm anuales.</li> <li>• Las precipitaciones son influenciadas por vientos cálidos provenientes del trópico y la condensación de la niebla.</li> </ul>
<b>Altitud</b>	La altitud varía entre 2.680 msnm y más de 4.000 msnm, alcanzando su punto máximo en el nevado Los Ilinizas (5.248 msnm).

<b>Componentes</b>	<b>Detalles</b>
<b>Biofísico</b>	
<b>Geología</b>	El suelo de Toacaso se asienta sobre la Placa Sudamericana, compuesto por facies distales, que son cuerpos sedimentarios homogéneos diferenciables por su geometría, litología y estructuras sedimentarias.

**Nota:** Obtenido de la fuente bibliográfico de (GAD Parroquial de Toacaso, 2013).

### 11.1. Análisis físico químico de arsénico en agua

Las tres muestras de agua fueron tomadas del río Blanco, Pucahuaico y la unión de estas. Para este análisis, se utilizó el método de espectrofotometría de absorción atómica, es así que

se detectó que el río Pucahuaico tiene una concentración mayor de arsénico con 0.1753 mg/L, lo que indica una contaminación significativa en esta área, comprando con los límites máximos permisibles para arsénico de 0.01 mg/L (equivalente a 10 µg/L) en agua para consumo humano, según el TULSMA y según la normativa ambiental vigente NTE INEN 097-A como se evidencia en la **Tabla 2**, asimismo, en el río Blanco se encontró una concentración de 0.0259 mg/L, también superior al límite permitido, y en la unión de ambos ríos, la concentración de arsénico fue de 0.1614 mg/L, cabe mencionar que en las tres muestras recolectadas existe una incertidumbre de 15.25 %, lo que sugiere que la contaminación persiste a lo largo de los cauces. Los parámetros de calidad del agua cumplen con los límites establecidos por la normativa ecuatoriana para efluentes, según el TULSMA, la temperatura (21.38-21.92 °C) está muy por debajo del límite de 40 °C, el pH (6.98-7.24) se encuentra dentro del rango permitido de 6.0 a 9.0, y la turbidez (4-5 NTU) está dentro de los valores aceptables según estándares internacionales, lo que sugiere que no hay afectación significativa a la claridad del agua. La dureza muestra niveles bajos (0.0-4.6 mg/L), indicando agua blanda que no representa riesgos para los ecosistemas ni problemas de incrustaciones en sistemas hidráulicos.

**Tabla 4.***Parámetros fisicoquímicos del agua*

Parámetro	Muestra 1 (Río Pucahuaico)	Muestra 2	Muestra 3 (Unión del río Pucahuaico y el TULSMA río Blanco)		Limite permisible
			(Río Blanco)		
<b>Temperatura</b>	21.92 °C	21.38 °C	21.43 °C		40 °C
<b>pH</b>	7.24	6.98	7.15		6 – 9
<b>Color</b>					
<b>436nm</b>	0.2 L/m	< 0.2 L/m	0.2 L/m		-
<b>525nm</b>	< 0.2 L/m	< 0.2 L/m	< 0.2 L/m		-
<b>620nm</b>	< 0.2 L/m	< 0.2 L/m	< 0.2 L/m		-
<b>Dureza 20</b>	- 4.6 °d	- 4.6 °d	0.0 °d		0 – 18 °d
<b>Turbidez</b>	5 NTU/NFU	4 NTU/NFU	5 NTU/NFU		≤ 5 NTU
<b>Concentración de Arsénico</b>	0.1753 mg/L	0.0259 mg/L	0.1614 mg/L		0.01 mg/L



El Índice de Calidad del Agua (ICA) es una herramienta importante para evaluar la calidad del agua en diferentes puntos de muestreo. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2011), las características físicas y químicas del agua pueden presentar ligeras variaciones, lo que influye en su calidad y en su impacto en el medio ambiente. En este estudio, se observó que la temperatura del agua se mantiene entre 21.38 °C y 21.92 °C, un rango clave para la disolución del oxígeno y la actividad biológica. Además, el pH varía entre 6.98 y 7.24, lo que indica condiciones neutras, aunque con una ligera tendencia ácida en algunas muestras. La turbidez, con valores entre 4 y 5 NTU/NFU, sugiere la presencia de partículas suspendidas dentro de los límites permitidos para aguas naturales (SEMARNAT, 2011).

El análisis de la calidad del agua es fundamental para el estudio del arsénico en el suelo, ya que el agua actúa como un medio de transporte para este contaminante. Cuando el agua utilizada para riego contiene arsénico en concentraciones elevadas, este elemento puede acumularse progresivamente en los suelos agrícolas, afectando su fertilidad y representando un riesgo para la salud humana. En la parroquia de Toacaso, los niveles de arsénico en el suelo y el agua fueron comparados con estudios previos para evaluar la persistencia del problema.

Los resultados de esta investigación muestran que los niveles de arsénico en el suelo varían entre 20.76 mg/kg y 77.86 mg/kg, superando el límite permisible de 12 mg/kg establecido en el TULSMA (2017). Estos valores coinciden con los reportados por Álvarez Agama (2020) y Ayala Portilla & Monge Banda (2024), lo que confirma una contaminación persistente en la zona.

## **11.2. Análisis de la concentración de arsénico de suelo**

### ***11.2.1. Análisis químico de arsénico presente en el suelo***

El análisis de concentración de arsénico en suelo, reveló que exceden significativamente el límite permisible de 12 mg/kg establecido por la Normativa Ambiental Ecuatoriana, Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) ver **Tabla 3**. Esta situación supone un peligro significativo para la salud, los cultivos y el entorno natural, y puede deberse a malas prácticas agrícolas o fuentes de contaminación naturales.

De este modo la muestra M2D refleja un resultado de 0,06 mg/kg, muy por debajo del límite permitido según (TULSMA, 2017), por otro lado el análisis de la muestra M2I reveló que el suelo tiene un nivel aceptable de arsénico, lo que indica que no hay riesgos importantes para su uso en actividades humanas.

**Tabla 5.**

*Concentración de arsénico en el suelo*

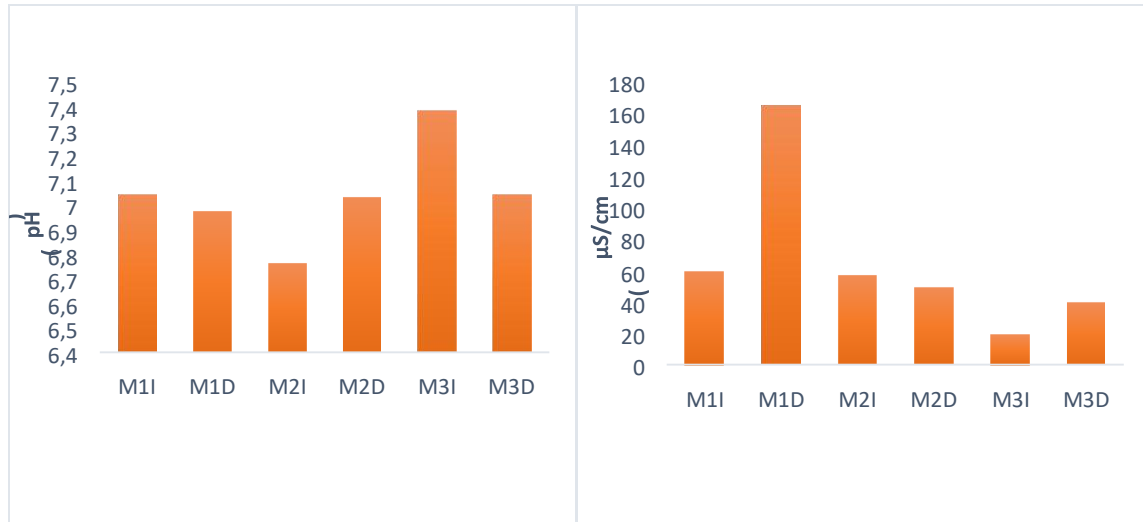
<b>Muestra</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Resultado (mg/kg)</b>	<b>Límite permisible (mg/kg)</b>	<b>Cumple (si/no) TULSMA</b>
M1D	Arsénico	20.76	12	No
M2D	Arsénico	0.06	12	Si
M3D	Arsénico	36.72	12	No
M1I	Arsénico	77.86	12	No
M2I	Arsénico	32.65	12	No
M3I	Arsénico	40.67	12	No

Los resultados obtenidos en este estudio muestran concentraciones de arsénico en suelos de Toacaso que superan el límite permisible de 12 mg/kg según el TULSMA. De manera similar, investigaciones previas han reportado niveles elevados en la misma zona.

Estudios previos en zonas cercanas han reportado resultados similares. Por ejemplo, un estudio en la junta de riego de Toacaso encontró una concentración promedio de arsénico en el suelo de 20.22 mg/kg, excediendo el límite permisible de 12 mg/kg según la normativa vigente (Astudillo et al., 2021).

### **pH – conductividad eléctrica**

La **Figura 6** indica como el pH varía entre niveles de 6.5 a 7.4, lo que indica que es neutro o un poco ácido. Es importante saber que el pH afecta cómo se mueve el contaminante en este caso el arsénico, y si el pH es más bajo, es más fácil que los metales pesados se disuelvan. Además, la conductividad eléctrica está entre 20 y 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que quiere decir que la muestra con más conductividad tiene más sales disueltas y los valores más bajos muestran que hay menos sales que se disuelven en el suelo.



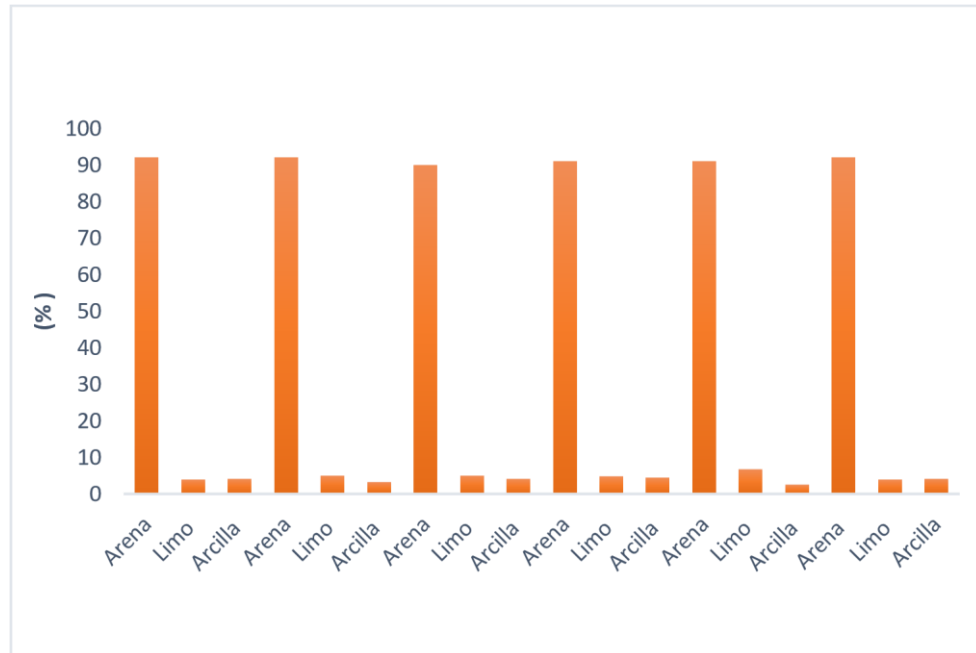
**Figura 3.** *pH y conductividad eléctrica del suelo*

El pH del suelo osciló entre 6.5 y 7.2, indicando condiciones neutras, con una conductividad eléctrica baja de 0.15 a 0.25 dS/m, lo que sugiere un nivel moderado de sales disueltas estudios realizados en el sector de Toacaso por Orozco Toapanta (2022), también se observaron valores de pH ligeramente más ácidos, entre 6.0 y 6.8, y una mayor conductividad eléctrica, que varía entre 0.30 y 0.45 dS/m. Estos niveles reflejan una mayor acumulación de sales solubles, especialmente en suelos cercanos a áreas de cultivo intensivo. Los suelos de este estudio presentan condiciones neutras y menor acumulación de sales en comparación con suelos más ácidos y conductivos de otros estudios realizados en Toacaso (Orozco Toapanta, 2022), lo que puede influir en la disponibilidad de nutrientes y la movilidad de metales pesados.

### 11.3. Análisis físicos de suelo

#### □ Textura

La **Figura 3** detalla los resultados de textura obtenidos mediante el método del Densímetro de Bouyoucos en el cual casi todas las muestras son mayormente arena, llegando a un 90% en cada una. El resto, un 5% aproximadamente, es limo y arcilla, en muy poca cantidad. Esto quiere decir que la tierra es principalmente arenosa. Esto facilita que el agua drene bien y que el aire circule, pero podría significar que el suelo no guarda mucha agua ni nutriente. Como todas las muestras tienen casi la misma cantidad de arena, la tierra de los lugares donde se tomaron las muestras debe ser parecida.



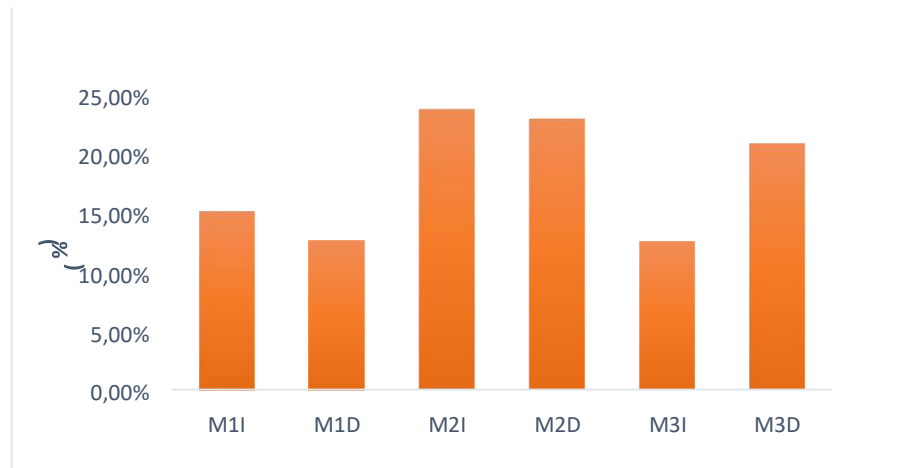
**Figura 4.** *Textura de suelo*

En el presente estudio, la textura del suelo es predominantemente arenosa 90%, lo que facilita la movilidad de contaminantes. En estudios realizados en el sector de Toacaso por Sucuy y Castillo (2021), se encontró una textura franco-arenosa con un 78% de arena, 19% de limo y 3% de arcilla. Además, se determinó que los suelos con este tipo de textura presentan una capacidad de retención de humedad del 20%, lo que contribuye a una mayor estabilidad estructural y menor susceptibilidad a la erosión. La textura de este estudio muestra un mayor contenido de arena en comparación con otros estudios realizados en Toacazo (Sucuy & Castillo, 2021), lo que sugiere una mayor vulnerabilidad a la erosión y al transporte de contaminantes. Esto podría influir en la capacidad de retención de nutrientes y agua en la zona.

Según Ríos *et al.*, 2010, reportó en su trabajo de investigación que los suelos con estructura granular tenían en su mayoría una textura arenosa 87.5%, y una menor proporción eran suelos areno-francos con 12.5%, sin suelos francos con esta estructura. Por otro lado, los suelos con estructura mostraron más variabilidad, con 25% areno-francos, 25% francos y 50% franco-arenosos, en comparación a los datos obtenidos en el presente estudio se encontró un mayor porcentaje de textura del suelo que es arenosa, sin presencia de suelos con texturas francas o franco-arenosas.

- **Humedad**

Se puede observar en la **Figura 4** que las muestras analizadas por el método de gravimetría revelan variaciones de humedad en los puntos muestreados, teniendo en cuenta que tres muestras se encuentran entre los 20.87% a 23.63% que son los que predominan porque se encuentran con más cercanía al efluente, facilitando la disolución y el transporte del arsénico.

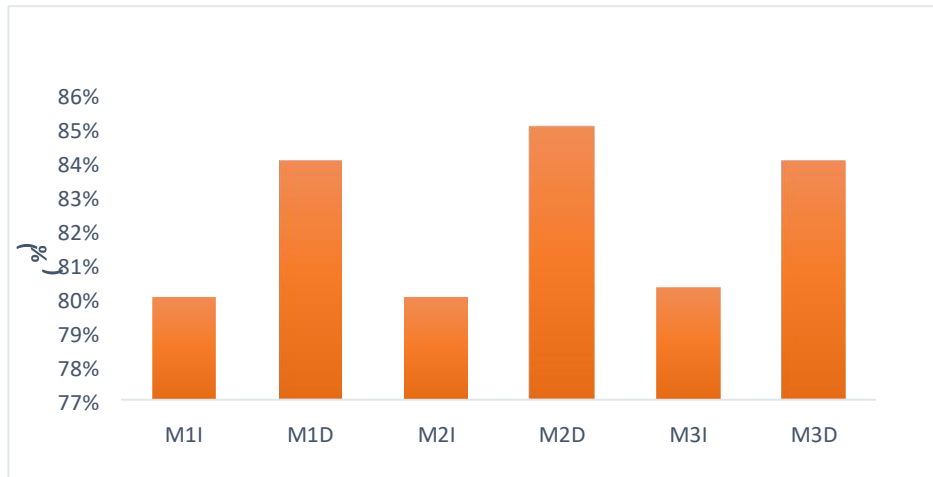


**Figura 5.** *Porcentaje de humedad del suelo de la zona de muestreo*

En el presente estudio, el porcentaje de humedad del suelo varió entre 12.63% y 15.07%, asociado a la textura arenosa que reduce la capacidad de retención de agua. En estudios realizados en el sector de Toacazo por Álvarez Agama (2020), se encontraron niveles de humedad más altos, con un rango del 18% al 22%. Este aumento se atribuye a la presencia de un 25% de limo y un 15% de arcilla, lo que mejora la capacidad del suelo para retener agua durante períodos secos. La menor humedad observada en este estudio refleja la influencia de la textura arenosa, en contraste con suelos de mayor retención hídrica analizados en otros estudios realizados en Toacazo (Álvarez Agama, 2020), lo que podría afectar la disponibilidad de agua para los cultivos.

- **Porosidad**

En la **Figura 5** indica que la porosidad está directamente relacionada con la textura arenosa del suelo, lo que facilita el movimiento de agua y contaminantes a través de la matriz del suelo. En este estudio, los valores de porosidad oscilan entre el 35% y el 40%, lo que indica una alta permeabilidad y un mayor riesgo de lixiviación de sustancias disueltas.



**Figura 6.** Porosidad del suelo

En estudios previos realizados en el sector de Toacaso según Ayala Portilla y Monge Banda (2024) reportaron niveles de porosidad moderados, con valores entre el 28% y el 33% en suelos con mayor contenido de limo (20%) y arcilla (15%). Este tipo de textura limita la lixiviación de metales pesados, ya que las partículas finas aumentan la capacidad de retención de agua y reducen la velocidad de infiltración. Comparando estos resultados con los obtenidos en la presente investigación, se observa que la porosidad en Toacaso es relativamente alta, lo que sugiere un mayor riesgo de lixiviación de contaminantes en comparación con suelos menos porosos. Esto podría tener implicaciones ambientales significativas, especialmente en áreas con actividad agrícola o industrial, donde la presencia de agroquímicos o residuos tóxicos podría generar contaminación de aguas subterráneas.

Por otro lado, la variabilidad en los niveles de porosidad entre diferentes muestras indica la influencia de factores adicionales, como la compactación del suelo, el contenido de materia orgánica y la estructura del perfil edáfico. Estudios adicionales podrían ayudar a comprender mejor cómo estos factores afectan la dinámica del agua y la movilidad de contaminantes en diferentes tipos de suelos. La alta porosidad en Toacaso sugiere un mayor riesgo de lixiviación de contaminantes en comparación con suelos menos porosos, como los analizados en otros estudios realizados en el mismo sector (Ayala Portilla & Monge Banda, 2024).

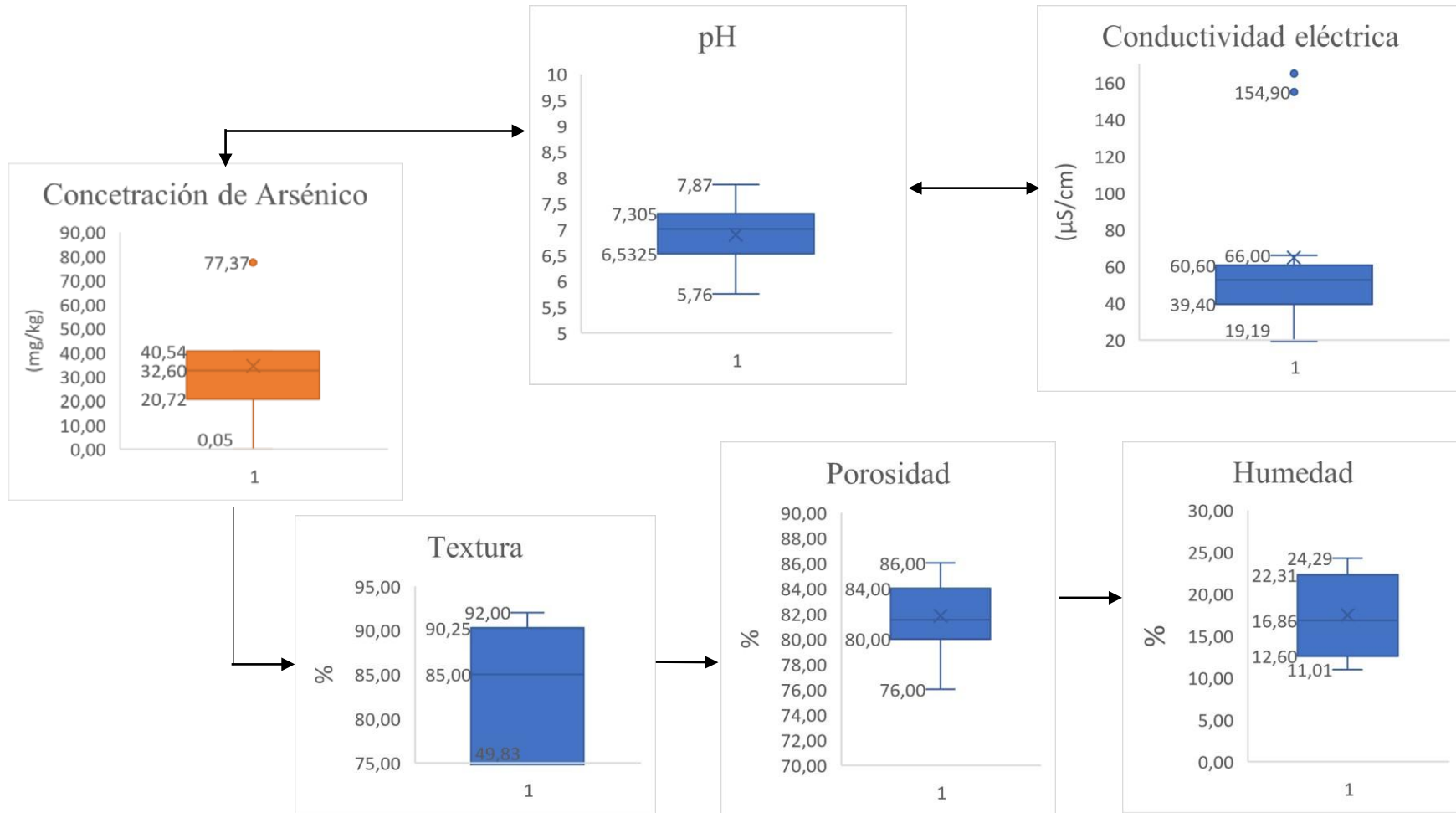
#### **11.4. Interpretación de Análisis estadístico**

La presencia y movilidad del arsénico en los suelos pueden verse influenciadas por una compleja interacción de factores químicos y físicos. Las concentraciones de arsénico parecen

estar relacionadas con el pH del suelo, la conductividad eléctrica (CE), textura, humedad y porosidad. En la **figura 8** se establece la relación de cada parámetro físico y químico en el suelo.

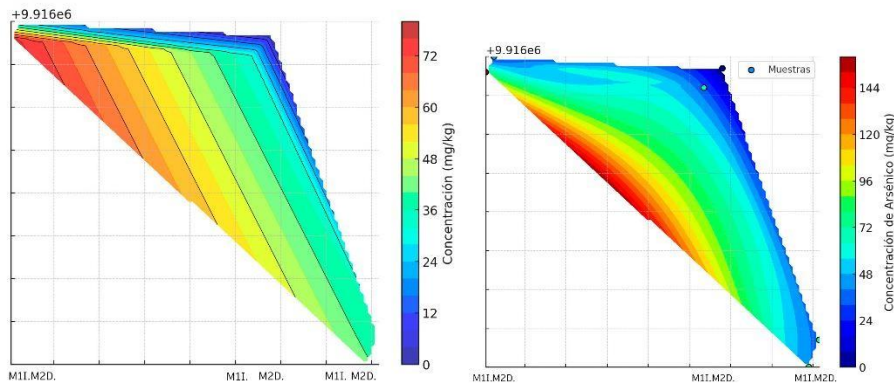
El pH del suelo es de aproximadamente 7.3, indica condiciones del suelo cercanas a la neutralidad o ligeramente ácidas. En estas últimas, el arsénico tiende a disolverse y moverse más fácilmente, según (Osorio, *et al.*,2020) esto hace que incremente su biodisponibilidad y sus riesgos potenciales asociados con la absorción de suelo. La conductividad eléctrica, presenta valores que oscilan entre 19.19 y 154.9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De acuerdo con (Gallart, 2017) la concentración de sales disueltas a una mayor solubilidad facilitarían el transporte de arsénico. En cuanto a la textura de suelo, al presentar un rango entre 49.83% y 92%, indica el contenido relativo de partículas que tienen diferente tamaño, como son la arena el limo y la arcilla, cuando abundan partículas de tamaño arena se dice que el suelo tiene textura arenosa Osorio, *et al.*,(2020) menciona que este al tener textura arenosa tienden a retener más arsénico debido a su alta capacidad de intercambio iónico, por lo que implica que ciertas áreas de la zona de estudio podrían tener una mayor capacidad de retención de arsénico, mientras que otras permitirían su movilidad.

Esto guarda relación con porosidad que, al tener un valor alto del 84 % , el volumen total de espacio poroso o número de poros que hay entre partículas sólidas facilitarían la infiltración y dispersión del arsénico en el perfil del suelo (FAO, 2025) menciona que el espacio poroso del suelo no ocupado por sólidos , dispersa y facilita el transporte de contaminantes En general el volumen del suelo debe estar constituido por 50% materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y 50% de espacio poroso. Finalmente, humedad del suelo, con un valor de 24.29%, ayudaría en la disolución y el transporte del arsénico, de acuerdo con (Murillo, 2023) los suelos más húmedos pueden facilitar la movilización del arsénico en forma iónica o como compuestos solu



**Figura 7.** *Relación de parámetros fisicoquímicos*

### 11.5. Análisis del mapa de la pluma de contaminación



**Figura 8.** *Pluma de contaminación de arsénico*

La **figura 10** muestra una simulación de la distribución potencial de la pluma de contaminación por arsénico después de 6 meses, considerando las condiciones actuales y las características del suelo, como la porosidad y la humedad. Esta proyección tiene en cuenta factores clave como la advección, la dispersión y la textura arenosa del suelo, que facilitan la movilización del contaminante. La simulación identifica las zonas donde se espera que las concentraciones de arsénico aumenten o disminuyan con el tiempo. Al comparar esta pluma simulada con los niveles actuales de contaminación (**Figura 10**), se puede evaluar la propagación potencial y el impacto de la contaminación por arsénico en la región de Toacaso, lo que subraya la necesidad de desarrollar estrategias de remediación y mitigación efectivas.

Al incluir estas descripciones, se establece una clara distinción entre el estado actual de la contaminación y un estado futuro proyectado, destacando la importancia de comprender el transporte de contaminantes y la necesidad de intervenciones oportunas. Además, ambas descripciones resaltan los factores clave que influyen en el comportamiento de la pluma, lo que permite una mejor comprensión del problema y la identificación de soluciones efectivas.

Investigaciones previas, como la de Bear (1972) sobre el transporte de solutos en medios porosos, han demostrado que la combinación de advección y dispersión influye en la forma y extensión de una pluma contaminante. En el área de estudio, el comportamiento del arsénico puede estar condicionado por la permeabilidad del suelo y las características hidrogeológicas locales. Factores como el coeficiente de permeabilidad, la velocidad del flujo y la interacción del arsénico con los componentes del suelo pueden influir en su movilidad, ya sea promoviendo

su adsorción o facilitando su lixiviación. Otro estudio realizado por Chamorro & López (2016) sobre la “*Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo*” mencionan que la masa de contaminante fluye dentro del tubo con una velocidad constante. Este proceso de transporte es el denominado advección. Mientras la masa se mueve, también se disgrega en el agua, entonces el contaminante empieza a ocupar un espacio creciente dentro del tubo, por lo tanto decrece en concentración con el tiempo. Este proceso se llama dispersión. El componente de mezcla, que a menudo se denomina dispersión mecánica, se desarrolla con las variaciones de la velocidad dentro del medio poroso, las cuales derivan en variaciones de concentración, que hacen que el contaminante se disperse.

El componente de difusión molecular conduce a la dispersión del contaminante debido a los gradientes de concentración. Este proceso ocurre aun cuando la velocidad del flujo es cero. La difusión molecular depende del grado de saturación o del contenido volumétrico del agua en el medio poroso (Chamorro & López, 2016), en comparación con el estudio realizado en Toacaso que examina un caso concreto donde el agua que desciende de los Ilinizas que fluye por los ríos Blanco y Pucahuaico y al realizar los debidos analisis de suelo reflejan una concentración de arsénico del 77.86 en la muestra M1, teniendo en cuenta que el suelo es arenoso lo que facilita la migración de contaminantes y evidencia la interacción con el efluente asi como lo indican los dos autores mencionados.

## **12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **12.1. Conclusiones**

La caracterización biofísica de la región de Toacaso destaco varios factores ambientales importantes. La zona enfrenta un aumento de la contaminación de los recursos hídricos debido al crecimiento poblacional y prácticas agrícolas insostenibles, este también como el vertido de residuos y el uso de agroquímicos.

La contaminación por arsénico en el suelo y el agua de la parroquia de Toacaso plantea un grave problema ambiental. Los análisis fisicoquímicos de los suelos revelaron características que influyen significativamente en la movilidad del arsénico. La textura predominantemente arenosa del suelo facilita la infiltración del agua, lo que a su vez facilita la difusión del arsénico por todo el perfil del suelo. Además, una alta humedad en el suelo indica cambios en la retención

de agua, lo que puede alterar las reacciones químicas que regulan la solubilidad del arsénico, afectando así su movilidad.

Los resultados de la simulación de la pluma de contaminación por arsénico en Toacaso evidencian una situación crítica que demanda atención urgente. La proyección de la distribución del arsénico, al considerar factores como la advección, la dispersión y las características del suelo, sugiere que las concentraciones de este contaminante podrían incrementarse en áreas específicas en los próximos seis meses. Esta situación resalta la necesidad de no solo evaluar el estado actual de la contaminación, sino también de anticipar su evolución futura. Comprender estos aspectos es fundamental para el desarrollo de estrategias efectivas de remediación y mitigación que aborden de manera integral el problema y protejan la salud pública y el medio ambiente.

## **12.2. Recomendaciones**

Según los resultados de la investigación, se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo que evalúe sistemáticamente la evolución de la contaminación por arsénico en los suelos y aguas de la región. Este programa debe incluir la toma periódica de muestras y el uso de técnicas analíticas estandarizadas para garantizar la validez y confiabilidad de los datos, lo que facilitará la detección oportuna de cambios en la calidad ambiental. Para mitigar el impacto ambiental de la contaminación existente, se sugiere aplicar técnicas de remediación como la fitorremediación, que utilizan plantas capaces de absorber y acumular arsénico de los suelos. Este enfoque no solo contribuirá a la recuperación de las áreas afectadas, sino también a la rehabilitación de los ecosistemas locales.

## **13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Acosta, M. (2007). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo] Dspace JSPUI. <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/635>
- Agila, B., Estudillo, L., & Segura, M. (2020). EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO EN MATRICES ACUOSAS DEL RÍO PILOTO, CANTÓN SANTA

ROSA, EL ORO, ECUADOR. UTMACH, FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD CARRERA DE BIOQUÍMICA Y FARMACIA.

- Agudelo, J., & Franco, R. (2009). APLICACIÓN DE LA LEY DE FICK Y EL MODELO DE PELEG PARA ESTUDIAR LA ABSORCIÓN DE AGUA EN EL FRIJOL CARGAMANTO OMBLIGO AMARILLO (*PHASEOLUS VULGARIS L.*) Y LA ARVEJA SECA (*PISAN SATIVA*) DURANTE LA REHIDRATACION. *Revista Publicaciones e Investigación* .
- Alvarado, S. (2015). EL AGUA DE RIEGO Y SU INFLUENCIA EN EL BUEN VIVIR DE LA COMUNIDAD LANGUALÓ GRANDE, PARROQUIA MULALÓ, CANTÓN LATACUNGA, PROVINCIA COTOPAXI. *Universidad Técnica de Ambato* .
- Álvarez Agama, J. (2020). Evaluación de metales pesados en suelos agrícolas de la parroquia Toacaso, Cotopaxi. Universidad Central del Ecuador.
- Ángel Balderas-Plata, M., Cajuste, L. J., Alberto Lugo-de la Fuente, J., & Vázquez-Alarcón, A. (2003). *SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS PROVENIENTES DE DEPÓSITOS DE VEHÍCULOS DE DESECHO* *Agricultural Soils Contaminated by Heavy Metals from a Scrapyard of Discarded Vehicles*. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57321401.pdf>
- Assan, M., & Gorosito, S. (2019). Relación del agua, suelo, planta en infiltración. Cátedra: Riego & Drenaje FCA UNCa .
- Astudillo, J., Pérez, M., & Rojas, L. (2021). *Evaluación de la contaminación por arsénico en suelos y cultivos en la zona de Toacaso*. Universidad Técnica de Cotopaxi. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/items/a8b659a5-d092-4656-8ba58df170b0b25a>
- Ayala Portilla, M., & Monge Banda, L. (2024). *Evaluación de la porosidad del suelo en Toacaso y su impacto en la lixiviación de metales pesados*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Ayala Portilla, R., & Monge Banda, C. (2024). *Análisis de contaminación por arsénico en suelos agrícolas de la provincia de Cotopaxi*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Ayala, J., & Monge, M. (2024). *Evaluación de la contaminación por arsénico en suelos y cultivos en la zona de Toacaso*. Universidad Técnica de Cotopaxi. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/items/a8b659a5-d092-4656-8ba5-8df170b0b25a>
- Barrio, N. (2016). *Metales pesados en suelos y sus efectos sobre la salud* [Tesis de fin de grado,

- Universidad Complutense Madrid] Doota Complutense  
<https://hdl.handle.net/20.500.14352/20743>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier.
- Byjus. (Enero de 2025). *Byjus*. <https://byjus.com/physics/darcys-law/>
- Camacho, C., Zabala Alarcón, N. V., & Flores Carpio, Y. G. (2020). Estimación del coeficiente de permeabilidad del suelo en la ciudad de Macas -Ecuador utilizando permeámetro de carga variable. *Dominio de Las Ciencias, ISSN-e 2477-8818, Vol. 6, N° 3, 2020 (Ejemplar Dedicado a: Julio-Septiembre 2020), Págs. 78-94, 6(3), 78–94*.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7539689&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7539689>
- Carlos, I. Y. (2018). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio Application of simplified models for dispersion of air pollutants. Case study. *Rev. Cubana Quím, 30(1), 2224–5421*.  
<http://ojs.uo.edu.cu/index.php/cq>
- Chavarría, A. (2021). Primera parte: Almacenamiento insaturado de agua en un perfil de suelo. *SciELO - Scientific Electronic Library Online*.  
[https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S037939822021000300015](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S037939822021000300015)
- Chamorro, C., & López, N. (2016). Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C*.  
[https://www.researchgate.net/publication/329372549\\_Modelacion\\_del\\_transporte\\_de\\_contaminantes\\_en\\_la\\_masa\\_de\\_suelo](https://www.researchgate.net/publication/329372549_Modelacion_del_transporte_de_contaminantes_en_la_masa_de_suelo)
- Cortes, C. L. D. (2022). REVISIÓN DE ALCANCE SOBRE EL IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y DE SALUD PÚBLICA DEL ARSÉNICO, 2011 A 2021. *In Braz Dent J. (Vol. 33, Issue 1)*.
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, 33, 7–21*.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Dorota Dec. (2012). El concepto de la relación Suelo-Agua-Planta. 1–18.
- Erazo López, E. A. (2019). *Uso De Algoritmo De Inteligencia Artificial Para Desarrollar Una Metodología Para Medir La Textura De Los Suelos*. Universidad Nacional De Chimborazo Facultad.

FAO. (17 de febrero de 2025). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de Portal de Suelos de la FAO: <https://www.fao.org/soilsportal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/> Facsa Ciclo Integral del Agua. (23 de 1 de 2017). Metales pesados.

Facsa Ciclo Integral del Agua. (23 de 1 de 2017). Metales pesados. <https://www.facsa.com/metales-pesados/#:~:text=%C2%BFQU%C3%89%20ES%3F,%2C%20cobre%2C%20plomo%20y%20cromo.>

Fernández, .. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, vol. 11, núm. 3, 147-170.

Gal, E., & Baena, A. R. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071. [https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biolmol/pdfs/08\\_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf](https://www.uco.es/dptos/bioquimica-biolmol/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA.pdf)

Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.

Gallart, M. F. (2017). La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del Parque Natural de la Albufera de Valencia. 1-34. Gañán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. Universidad de Sevilla.

[https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10\\_48.pdf](https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10_48.pdf)

GOBIERNO AUTONOMO DESCENTRALIZADO PARROQUIAL RURAL DE TOACASO. (2013). Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial.

Gómez Giraldo, Andrea I.; Álvarez-Villa, O. D., ; Monsalve, G. ; Vélez, J. I., & ; Blessent, D. R. (2016). *SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN UN MEDIO SUBTERRÁNEO HETEROGENEO MEDIANTE EL RASTREO ALEATORIO DE PARTICULAS SIMULATION*. 9, 1–23.

González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Nuñez, L. (2011). Caracterización De La Porosidad Edáfica Como Indicador De La Calidad Física Del Suelo. *Terra Latinoamericana*, 29, 369–377.

GONZÁLEZ-CERVANTES, G., SÁNCHEZ-COHEN, I. y ROSSIGNOL, J.P. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis

- de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. 19, núm. 3, julio-septiembre de 2004, pp. 15-23.
- Imbago, C., & Oña, E. (2019). BIORREMEDIACIÓN DE AGUA CONTAMINADA CON ARSÉNICO PROVENIENTE DE LA PARROQUIA TOACASO, MEDIANTE EL USO DE *Pleurotus ostreatus*, *Trichoderma harzianum* y *Pseudomonas aeruginosa*. Universidad Politécnica Salesiana SEDE Quito.  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17415/1/UPS-QT13961.pdf>
- Instituto del agua . (15 de Febrero de 2025). Obtenido de Instituto del agua :  
<https://institutodelagua.es/hidrologia/ley-de-darcy-en-hidrologiahidrologia/>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1108:2014: Calidad del agua para consumo humano*. Quito, Ecuador.
- Instituto Nacional de Salud Pública . (2020). Importancia del agua para el buen funcionamiento de nuestro organismo. *Gobierno de México*.  
[apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/ibi\\_apps/WFServlet28b9.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2013/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet28b9.html)
- JIMÉNEZ VELASCO, J. H. (2020). *ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO LOS TSÁCHILAS-ESMERALDAS UTILIZANDO EL SOFTWARE [ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO]*.  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14778/1/236T0538.pdf>
- Jiménez, A. (2020). *Impacto de los contaminantes en suelos agrícolas: Un análisis del transporte de plumas de contaminación*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), 45-62.
- Jiménez, J. (2020). DETERMINACIÓN DE LA PLUMA DE CONTAMINACIÓN DE UN DERRAME DE COMBUSTIBLE EN LA VÍA SANTO DOMINGO DE LOS TSÁCHILAS-ESMERALDAS UTILIZANDO EL SOFTWARE NAPL SIMULATOR. *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo* .  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14778/1/236T0538.pdf>
- Jiménez, P., Díaz, X., Naves, M., Vega, A., Medeiros, B., & Curi, N. (2024). Evaluación y comprensión de la contaminación por arsénico en suelos agrícolas y sedimentos lacustres de la parroquia Papallacta, Ecuador, a través de índices ecotoxicológicos. *SIEMBRA*.  
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/6628/8102>

- Londoño, L. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL . Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a17.pdf>
- Maldonado, L. (2019). Evaluación del comportamiento de la pluma contaminante ante eventuales escenarios de contaminación por hidrocarburo liviano en aguas subterráneas dentro de dos instalaciones industriales utilizando el Software visual Modflow. *UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERÍAS FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL*. [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1738/digital\\_22710.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1738/digital_22710.pdf?sequence=1)
- Martínez, F., Sosa, F., & Ortiz, J. (2010). Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 89–103.
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., González-Ríos, J., Galvis-Spínola, A., & Santiago-Cruz, M. (2006). *CAMBIOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO A TRAVÉS DEL TIEMPO EN LOS SISTEMAS DE MAÍZ BAJO TEMPORAL Y MANGO BAJO RIEGO EN LUVISOLES DEL ESTADO DE CAMPECHE*.
- Mero, M., Pernía, B., Ramírez-Prado, N., Bravo, K., Ramírez, L., Larreta, E., & Egas, F. (2019). Concentration of cadmium in water, sediments, eichhornia crassipes and pomacea canaliculata in the Guayas (Ecuador) river and tributaries. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(3), 623–640. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.03.09>
- Munro, J. (2020). Groundwater Contamination. *Toxic Chemicals in America: Controversies in Human and Environmental Health: Volume 1-2*, 1–2, 318–324. <https://doi.org/10.1029/eo065i040p00735-01>
- Muñoz, F. (2025). *Importancia del agua en la nutrición de cultivos*. Cenicaña: Carta trimestral.
- Murillo Ripalda. (2023). Importancia de la humedad del suelo en el cultivo de soya (Glycine max. L) en el Ecuador. *Universidad Tecnica de Babahoyo*, 16-25.
- Olmos-Palma, D. A. (2022). Efectos sobre la salud por agua contaminada con metales pesados. *Universidad Autonoma de Estado de Hidalgo*, 4(1), 43–47. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/issue/archive>
- Orozco Toapanta, M. (2022). *Impacto ambiental de la contaminación por metales pesados en cuerpos de agua de la zona rural de Cotopaxi*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

- Orozco Toapanta, R. (2022). *Determinación de pH y conductividad eléctrica en suelos agrícolas de Toacaso*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Orozco, R. (2022). *Estudio hidroquímico y geológico de la contaminación por arsénico en suelos y aguas de Toacaso*. Universidad Técnica de Ambato. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/35549/1/Rita%20Orozco.pdf>
- Orozco, R. (2022). EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA - ÍNDICE DE ARSÉNICO EN LA QUEBRADA RASUYACU EN LA PARROQUIA TOACASO DEL CANTÓN LATACUNGA. Universidad Técnica de Ambato.  
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/838f91ea-5099-4125-b5fb-74175c7f48fe/content>
- Osorio Rivera, M. Á., Haro Altamirano, J. P., Carrillo Barahona, W. E., & Negrete Costales, J. H. (2020). *SUELOS CARACTERIZACIÓN E IMPORTANCIA*. La Plata Buenos aires: ©Puerto Madero Editorial Académica (J.C. Santillán Lima).
- Oyarzún, R. (2007). Transporte de contaminantes en aguas subterráneas. CEAZA - Chile, 22, 1–32.
- Pamela, K., Ledezma, R., Pedro, C., & Revilla, E. (2014). Heavy Metal Contamination. Heavy Metal Contamination of Water and Soil, 51–51. <https://doi.org/10.1201/b16566-4>
- Pérez, L., & Jaramillo, F. (2023). *Impacto de la actividad agrícola en la conductividad eléctrica del suelo en Toacaso*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Pérez-Leira, R., Cabrera-Estupiñán, E., Cedeño-Caicedo, G., Delgado-Anchundia, H. E., Mendoza-Briones, A. R., & Chávez-García, L. E. (2018). Irrigation Regime for Crops in Manabí, Ecuador: Edaphic Study. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(4). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2071-00542018000400001&lang=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542018000400001&lang=es)
- Pijal, Á. (12 de Junio de 2020). Importancia del Suelo en la Conservación Ambiental. UTN. <https://recursosnaturales.utn.edu.ec/?p=1281>
- Ramirez Ramos, M. (2017). *Derrames De Hidrocarburos En Canarias*. 1–126.
- Reyes - Jaramillo I. (1996). Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Universidad Autónoma Metropolitana (México, México). Unidad Iztapalapa
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*.
- Ríos, M., Ruiz, M., Maduro, R., & García, H. (2010). Estudio exploratorio de las propiedades físicas de suelos y su relación con los deslizamientos superficiales: Cuenca del río

- Maracay, estado Aragua-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana.  
<https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730385004.pdf>
- Ruiz, A., & Romero, F. (2018). Relaciones entre agua y sedimento en ríos de origen torrencial. *Asociación Española de Limnología*, 1; 2.
- S. E. Pabón, R. Benítez, R. A. S.-V. y J. A. G. (2023). Gabon 2020. *2020 Orange Book of Results - Volume 3*, 14(27), 190–191. <https://doi.org/10.18356/9789210057738c088>
- Sánchez-Córdova, T., Aldrete, A., Cetina-Alcalá, V. M., & López-Upton, J. (2016). Caracterización de medios de crecimiento compuestos por corteza de pino y aserrín. *Madera y Bosques*, 14(2), 41–49. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421211>
- Sanmiguel, J., & Guerrero, S. (2017). Validación del método para determinar Pb, Cd, Ni por espectrometría de absorción atómica de llama en agua y en suelo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 47–63.  
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/7019/1/236T0275.pdf>
- Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Universidad de Medellín*, 4\_5.
- Sucuy, V., & Castillo, J. (2021). *Estudio de la textura del suelo en la subcuenca del río Toacaso y su influencia en la estabilidad estructural*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
- TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE. (2017). ANEXO 2 DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACION PARA SUELOS CONTAMINADOS. Decreto Ejecutivo 3516.  
<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- TULSMA. (2017). Texto unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. Libro VI Anexo 2. Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados. *Ministerio Del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*, 18.