



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL
RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingeniero Ambiental

Autor: Mancheno Solina Adrian
Leonardo

Tutor:
Agreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR

Julio 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Mancheno Solina Adrian Leonardo, con cédula de ciudadanía No. 1851041424, declaro ser autor del presente Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA”**, siendo el Ingeniero Mg. José Luis Agreda Oña, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, 23 de julio del 2025



Adrian Leonardo Mancheno Solina
C.C: 1851041424
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 **MANCHENO SOLINA ADRIAN LEONARDO**, identificado con cédula de ciudadanía **1851041424** de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL 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. – **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA**”, 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: octubre 2019 - marzo 2020

Finalización de la carrera: abril 2025 - agosto 2025

Tutor: Ing. Agreda Oña José Luis Mg.

Tema: “**ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA**”

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, **EL 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 **EL 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.

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 **EL 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 **EL 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 **EL 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 23 días del mes de julio del 2025.

Adrian Leonardo Mancheno Solina

EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

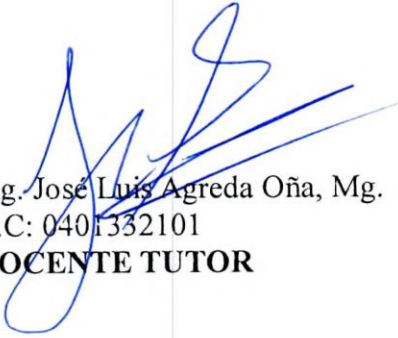
LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA” de Mancheno Solina Adrián Leonardo, 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 ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 23 de julio del 2025




Ing. José Luis Agreda Oña, Mg.
C.C: 0401332101
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, el postulante: Mancheno Solina Adrian Leonardo, con el título del Proyecto de Investigación: **“ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA”** ha 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, 23 de julio del 2025


Dr. José Antonio Andrade Valenera, PhD.
C.C: 0502524481

LECTOR 1 (PRESIDENTE)


Ing. Andrés Sebastian Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063

LECTOR 2 (MIEMBRO)


Lcdo. Manuel Patricio Clavijo Cevallos, PhD.
CC: 0501444582
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a los profesores que acompañaron el desarrollo de este proyecto. Su guía, sus observaciones oportunas y sus correcciones fueron fundamentales para mejorar cada detalle y dar forma a este trabajo. Gracias por compartir su conocimiento, por su paciencia y por el compromiso demostrando en cada etapa del proceso. Su apoyo ha sido clave para que este proyecto alcance el nivel que hoy presenta.

Adrian Leonardo Mancheno Solina

DEDICATORIA

Dedico este proyecto con todo mi cariño a mi familia, quienes han sido mi mayor pilar a lo largo de este camino. Estuvieron presentes en los momentos más difíciles, cuando sentí que las fuerzas flaqueaban, y su apoyo fue la luz que me ayudo a seguir adelante. Gracias por su amor incondicional, por cada palabra de aliento, por creer en mi incluso cuando yo dudaba. Este logro no solo es mío, sino también suyo, porque sin ustedes no habría llegado hasta aquí.

Adrian Leonardo Mancheno Solina

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “ANÁLISIS DE ADVECCION Y DISPERSION DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA”.

Autor:

Mancheno Solina Adrian Leonardo

RESUMEN

La gestión adecuada de los vertidos urbanos constituye un aspecto fundamental dentro de la gestión integral de residuos, orientada al cumplimiento de los principios de sostenibilidad y de ciudades verdes. El objetivo de este estudio fue modelar matemáticamente los procesos de advección, transporte y reacción de los lixiviados generados en el relleno sanitario del cantón Latacunga, evaluando su comportamiento en el subsuelo ante un escenario de falla en el sistema de impermeabilización. La investigación se desarrolló bajo un diseño cuantitativo, aplicado y cuasi-experimental, estructurado en dos fases: una fase descriptivo-diagnóstica, en la que se caracterizaron los parámetros físico-químicos del lixiviado, y una fase predictiva, basada en la modelación numérica del transporte de contaminantes mediante el software CTRAN/W. Este enfoque permitió no solo caracterizar el estado actual del relleno sanitario, sino también simular escenarios potenciales de afectación a los cuerpos de agua subterráneos. Los resultados evidenciaron que la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) disminuyeron aproximadamente un 50 % durante el transporte en el subsuelo, alcanzando concentraciones finales de 3.500 mg/L y 1.250 mg/L, respectivamente, valores que continúan superando los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana, Acuerdo Ministerial 097-A. El modelamiento predijo que, en un periodo de 90 días, la pluma contaminante podría avanzar 2 m en sentido vertical y 4 m lateralmente, representando un riesgo potencial para el acuífero somero ubicado a 11 m de profundidad, especialmente en lo referente a DBO, DQO y nitrógeno, cuya movilidad fue alta. En contraste, los fenoles 0,26 mg/L que mostraron una dispersión limitada, por lo que no se consideraron una amenaza significativa en el corto plazo. En conclusión, el estudio confirma la vulnerabilidad del subsuelo y del acuífero subyacente ante una eventual falla en la barrera impermeable, destacando la necesidad de establecer planes de monitoreo y estrategias de remediación temprana como parte de los planes de contingencia técnica del relleno sanitario.

Palabras clave: Residuos, hidrogeología, pluma contaminante, relleno sanitario, contaminación de suelos

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI **FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES**

THEME: “ANALYSIS OF LEACHATE ADVECTION FROM THE LATACUNGA DISTRICT LANDFILL”

Author:

ABSTRACT

Proper management of urban waste is a fundamental aspect of comprehensive waste management, aimed at complying with the principles of sustainability and green cities. The objective of this study was to mathematically model the advection, transport, and reaction processes of leachate generated in the Latacunga canton landfill, evaluating its behavior in the subsoil in the event of a failure in the waterproofing system. The research was carried out using a quantitative, applied, and quasi-experimental design, structured in two phases: a descriptive diagnostic phase, in which the physical-chemical parameters of the leachate were characterized, and a predictive phase, based on numerical modeling of contaminant transport using CTRAN/W software. This approach made it possible not only to characterize the current state of the landfill, but also to simulate potential scenarios of impact on groundwater bodies. The results showed that Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD) decreased by approximately 50% during transport in the subsoil, reaching final concentrations of 3,500 mg/L and 1,250 mg/L, respectively, values that continue to exceed the permissible limits established in Ecuadorian environmental regulations, Ministerial Agreement 097-A. The modeling predicted that, over a period of 90 days, the contaminant plume could advance 2 m vertically and 4 m laterally, posing a potential risk to the shallow aquifer located at a depth of 11 m, especially with regard to BOD, COD, and nitrogen, which had high mobility. In contrast, phenols at 0.26 mg/L showed limited dispersion and were therefore not considered a significant threat in the short term. In conclusion, the study confirms the vulnerability of the subsoil and the underlying aquifer to a possible failure of the impermeable barrier, highlighting the need to establish monitoring plans and early remediation strategies as part of the landfill's technical contingency plans.

Keywords: Waste, hydrogeology, Contaminant plume, Landfill, Soil contami

INDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	v

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vi
AGRADECIMIENTO.....	viii
DEDICATORIA.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. JUSTIFICACIÓN.....	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	5
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	5
6. OBJETIVOS DEL PROYECTO	7
6.1. Objetivo General.....	8
6.2. Objetivos Específicos	8
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	8
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA	9
8.1. Relleno sanitario	9
8.2. Funcionamiento relleno sanitario	9
8.3. Lixiviados en un relleno sanitario.....	10
8.4. Flujo de lixiviado a través del relleno sanitario y subsuelo.....	10
8.5. Caracterización físico química de lixiviados.....	11
8.5.1. Composición y Características	11
8.5.2. <i>Componentes Orgánicos e Inorgánicos</i>	11
8.5.3. pH y Conductividad.....	11
8.5.4. Variaciones Estacionales	11
8.5.5. Toxicidad y Riesgos Ambientales	11
8.6. Transporte de contaminantes en medios porosos	12

8.6.1. Principios de advección, dispersión y difusión molecular	12
8.6.2. Advección.....	12
8.6.3. Difusión.....	12
8.6.4. Dispersión.....	12
8.7. Ecuación Advección–Dispersión–Reacción en rellenos sanitarios.....	13
8.7.1. Mecanismos de advección: Transporte por Flujo de Fluidos.....	13
8.7.2. Mecanismo de dispersión: Mezcla y Difusión	14
8.8. Dinámica de Reacciones: Degradación y Sorción.....	14
8.9. Retardo del contaminante y coeficiente de distribución K_D – dK_d	15
8.9.1. Retraso de Contaminantes	15
8.9.2. Coeficiente de Distribución K_D	15
8.10. Soluciones Analíticas y Numéricas	16
8.10.1. Soluciones Analíticas	16
8.11. Modelamiento Numérico.....	16
8.12. Factores que afectan la movilidad de contaminantes	16
8.13. Diferencias entre transporte en suelos saturados frente a suelos no saturados.....	16
8.14. Fundamentos del método de elementos finitos en simulación hidrogeológica y Modelación acoplada de flujo y transporte	17
8.14.1. Fundamentos del método de elementos finitos	17
8.14.2. Modelación acoplada de flujo y transporte	17
8.15. Parámetros de entrada: dispersividad, contenido de agua, condiciones de frontera, tipo de contaminante y validación y calibración de modelos numéricos	18
8.15.1. Parámetros de entrada.....	18
8.15.2. Validación y calibración de modelos	18
8.15.3. Limitaciones del modelo	19
8.16. Propiedades hidráulicas del suelo y su influencia	19
8.16.1. Curva de retención de humedad	19
8.16.2. Conductividad hidráulica saturada y no saturada.....	20

8.17. Atenuación y reacciones químicas en el suelo	21
8.17.1. Adsorción reversible de contaminantes	21
8.17.2. Biodegradación de compuestos orgánicos.....	21
8.17.3. Retención y adsorción de metales pesados.....	21
8.17.4. Influencia del pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC)	21
8.18. Propiedades hidráulicas del suelo y caracterización del relleno sanitario.....	22
8.19. Teoría del transporte de contaminantes en medios porosos	22
8.20. Aplicación a la gestión ambiental y toma de decisiones	23
8.21. Límites máximos permisibles de presencia de contaminantes en el suelo	23
9. HIPOTESIS	23
10. ÁREA DE ESTUDIO.....	24
11. METODOLOGÍA.....	24
11.1. Tipo y enfoque de Investigación.....	24
11.2. Etapas metodológicas del proyecto de investigación	25
11.2.1. Objetivo 1: Recolección de información del sitio	25
11.3. Objetivo 2: Muestreo y análisis físico-químico de lixiviados	25
11.3.1. Muestreo de lixiviado	25
11.3.2. Parámetros analizados y métodos aplicados.....	25
11.3.3. Validación estadística de los datos	26
11.4. Objetivo 3: Modelación numérica del transporte de contaminantes	27
11.4.1. Modelado del flujo de agua (SEEP/W)	27
11.4.2. Modelado del transporte de contaminantes (CTRAN/W).....	27
11.4.3. Salidas del modelo:.....	28
11.5. Instrumentos y materiales requeridos	28
11.6. Normativas y referencias técnicas	28
11.6.1. Control de calidad analítica	28
11.7. Tratamiento de resultados.....	28

11.7.1. ANOVA del modelo.....	29
11.7.2. Estadística descriptiva	29
11.7.3. Cálculo de medidas de tendencia central.....	29
11.7.4. Medidas de dispersión	30
11.7.5. Representación gráfica	30
11.7.6. Interpretación ambiental.....	30
11.7.7. Validación de simulación vs datos reales.....	30
12. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS.....	31
13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	31
13.1. Objetivo Específico 1: Recolección y análisis de información del relleno sanitario ..	32
13.1.1. Ubicación geográfica y delimitación del área de estudio.....	32
13.1.2. Caracterización topográfica y estratigráfica.....	33
13.1.3. Discusión sobre la caracterización topográfica	34
13.1.4. Información sobre el diseño y operación del relleno sanitario.....	35
13.1.5. Caracterización hidrogeológica del sitio	36
13.1.6. Discusión sobre la relevancia de esta etapa para la simulación	36
13.2. Objetivo específico 2: Propiedades fisicoquímicas del lixiviado y regulación legal. 36	
13.2.1. Discusión medidas de tendencia central.....	37
13.2.2. Discusión del Diagrama de cajas.....	38
13.2.3. Discusión y análisis de la caracterización del lixiviado en relación a los límites máximos permisibles.....	39
13.2.4. Discusión sobre el análisis ANOVA	41
13.3. Objetivo específico 3: Modelación numérica del transporte de contaminantes resultados y análisis	41
13.3.1. Condiciones de frontera.....	42
13.3.2. Simulación de concentraciones de materia orgánica en el suelo para 90 días	43
13.3.3. Validación de datos por error cuadrático medio.....	45
14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46

14.1. Conclusiones.....	46
14.2. Recomendaciones	47
15. BIBLIOGRAFÍA.....	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Beneficiarios del Proyecto</i>	5
Tabla 2. <i>Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados.</i>	8
Tabla 3. <i>Estructura del proceso de Investigación</i>	24
Tabla 4. <i>Métodos para los parámetros fisicoquímicos del lixiviado</i>	25
Tabla 5. <i>Recolección de datos</i>	28
Tabla 6. <i>Herramientas de validación de datos</i>	30
Tabla 7. <i>Coordenadas de los vértices del relleno sanitario</i>	32
Tabla 8. <i>Resumen de componentes Hidrogeológicos para la simulación</i>	36
Tabla 9. <i>Parámetros de estadística descriptiva sobre los contaminantes del lixiviado.</i> ..	36
Tabla 10. <i>Resumen parámetros fisicoquímicos del lixiviado frene a la regulación Ambiental Ecuatoriana</i>	39
Tabla 11. <i>Resultados ANOVA</i>	41
Tabla 12. <i>Análisis y discusión del error cuadrático medio</i>	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Área de estudio</i>	23
Figura 2. <i>Área de estudio y elevación de la celda emergente</i>	32
Figura 3. <i>Mapa de pendientes del relleno Sanitario</i>	33
Figura 4. <i>Perfil topográfico del relleno Sanitario</i>	34
Figura 5. <i>Comparación DQO y DBO monitoreados.</i>	38
Figura 6. <i>Malla de simulación SEEP/W</i>	42
Figura 7. <i>Simulación de transporte de contaminantes</i>	43
Figura 8. <i>Comportamiento de fenoles</i>	44

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título

“ANÁLISIS DE ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO INCHAPO LATACUNGA”

Lugar de ejecución.

Inchapo, Parroquia Eloy Alfaro, Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi, Zona 3.

Institución, unidad académica y carrera que auspicia

Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Carrera de Ingeniería Ambiental

Nombres de equipo de investigadores

Tutor: Mg. José Luis Ágreda Oña

Lectores: PhD. Patricio Clavijo, PhD. José Andrade, Mg. Andrés Moreno.

Postulante: Sr. Adrian Mancheno **Área**

de Conocimiento.

Ciencias de la Tierra.

Línea de investigación:

Energías Alternativas y Renovables, eficiencia energética y protección Ambiental.

Línea de Vinculación:

Gestión de recursos naturales, biodiversidad, biotecnología y genética, para el desarrollo humano y social.

2. INTRODUCCIÓN

La mala gestión de los residuos urbanos es uno de los mayores retos ambientales que enfrentan las ciudades en expansión (Morales Crozo, 2022). Uno de los efectos más graves de este problema es la formación de lixiviados, líquidos altamente contaminantes que surgen cuando los desechos orgánicos se descomponen y el agua se filtra a través de la basura acumulada en los vertederos. Si no se controlan adecuadamente, estos lixiviados pueden penetrar en el suelo y llegar hasta las aguas subterráneas, poniendo en riesgo tanto los ecosistemas como la salud de las personas.

Numerosos estudios han confirmado que estos lixiviados contienen una mezcla peligrosa de sustancias orgánicas e inorgánicas, incluyendo metales pesados como plomo, cadmio y cromo, que pueden acumularse en el ambiente y causar toxicidad con el tiempo (Cañarte Sarango & Castillo Ortega, 2023). Por eso, analizar su composición y cómo se dispersan en el suelo resulta clave para evaluar riesgos y diseñar soluciones efectivas.

Esta investigación busca entender cómo se filtran los lixiviados desde un vertedero hacia el subsuelo, combinando análisis físico-químicos de muestras reales con simulaciones numéricas realizadas mediante el software CTRAN/W (Zurita & Acosta, 2021). Esta herramienta, parte del paquete GeoStudio, modela el movimiento de contaminantes en el suelo, teniendo en cuenta procesos como el flujo del agua, la dispersión de sustancias y, en algunos casos, su retención por adsorción.

El método empleado sigue el enfoque propuesto, que integra modelos de flujo de agua y transporte de contaminantes para predecir cuánto tardan los lixiviados en alcanzar las napas subterráneas y en qué concentraciones (Ambuludi-Paredes et al., 2021). Con estos datos, se puede anticipar el impacto ambiental y plantear medidas de contención más eficaces.

El estudio cobra relevancia porque ayuda a entender cómo se mueven los contaminantes en escenarios reales, lo que es fundamental para proteger los recursos hídricos y avanzar hacia un manejo sostenible de los residuos (Esmaili Nasrabadi et al., 2024). Sus hallazgos podrían apoyar el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial aquellos vinculados al agua limpia (ODS 6), las ciudades sustentables (ODS 11) y la acción climática (ODS 13).

Entre sus limitaciones, se reconoce que los resultados dependen de la precisión de los datos disponibles sobre el suelo y los lixiviados. Además, aunque la simulación abarca solo 90 días, en la realidad el proceso puede durar años (Zhang et al., 2021). Aun así, el modelo ofrece una primera aproximación valiosa para guiar futuras investigaciones y políticas ambientales.

3. JUSTIFICACIÓN

La creciente preocupación por la contaminación de los recursos hídricos subterráneos ha motivado la búsqueda de herramientas científicas que permitan comprender y predecir el comportamiento de los lixiviados en el subsuelo (J. Nyika et al., 2019). Los rellenos sanitarios, si bien constituyen una solución técnica para el manejo de residuos sólidos urbanos, también representan una fuente potencial de contaminación ambiental cuando sus sistemas de impermeabilización o drenaje resultan ineficientes (J. M. Nyika et al., 2019). En este contexto, la infiltración de lixiviados con alto contenido de compuestos tóxicos, tales como metales pesados y materia orgánica no degradada, constituye una amenaza directa para la salud humana y para la integridad de los ecosistemas desde el punto de vista de la ingeniería ambiental.

El presente estudio se justifica por la necesidad de contar con una evaluación técnica y científica del comportamiento de los lixiviados en el suelo, utilizando herramientas de simulación numérica avanzadas como CTRAN/W, que permiten modelar el transporte adjetivo-dispersivo de contaminantes (Harish Kumar Reddy et al., 2021). Este tipo de análisis contribuye a anticipar la migración de sustancias peligrosas hacia los acuíferos, brindando soporte para la toma de decisiones en el diseño de barreras físicas, sistemas de monitoreo y planes de contingencia ambiental.

Desde el punto de vista teórico, la investigación aporta al conocimiento sobre la dinámica del flujo de contaminantes en medios porosos, integrando conceptos de hidrogeología, química ambiental e ingeniería geotécnica (Racha Jammoul & Muhsin Rahhal, 2022). A nivel práctico, ofrece una metodología replicable para evaluar el riesgo ambiental asociado a sitios de disposición final de residuos sólidos, a partir de la combinación de datos de laboratorio y simulación computacional (J. Nyika & Onyari, 2019).

Además, el trabajo se alinea con los principios de sostenibilidad y prevención de la contaminación, tal como lo establecen políticas ambientales internacionales y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, se vincula con los ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima) (Stoppiello, 2021).

Finalmente, la investigación responde a una necesidad local identificada en el territorio, donde los lixiviados representan un riesgo real para las fuentes de agua y suelos agrícolas (Barakat & Rowe, 2025). Al proporcionar una base científica para la caracterización y predicción del comportamiento de estos contaminantes, se fortalece la capacidad de respuesta técnica e institucional para gestionar los impactos ambientales derivados de los residuos sólidos urbanos (Biondi et al., 2023).

La correcta gestión de los lixiviados generados en rellenos sanitarios constituye un tema de prioridad ambiental y de salud pública, debido a su alto potencial contaminante y a la creciente producción de residuos sólidos en Ecuador. Según datos del MAATE (2023), el país genera más de 4,8 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos por año, de los cuales alrededor del 76 % se dispone en rellenos sanitarios. Estudios recientes evidencian que la infiltración de lixiviados con alta carga orgánica y presencia de nutrientes (N y P) y micro contaminantes (fenoles, metales pesados) puede provocar contaminación de suelos y aguas subterráneas, alterando las condiciones físico-químicas y microbiológicas de estos medios (Chamorro & López-Acosta, 2016; Fellner & Brunner, 2010). Estas alteraciones incluyen la movilización de metales pesados bajo condiciones reductoras, la pérdida de fertilidad del suelo, y la degradación de la calidad del agua, lo que representa riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas.

En el contexto ecuatoriano, la problemática adquiere mayor relevancia legal y técnica bajo el marco normativo vigente. El Acuerdo Ministerial 097-A, emitido por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, establece las Normas de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua y Suelo, fijando límites permisibles estrictos para parámetros como DQO (≤ 500 mg/L), DBO (≤ 250 mg/L), nitrógeno total (≤ 40 mg/L) y fenoles ($\leq 0,2$ mg/L). Los análisis físico-químicos realizados en este estudio evidencian que los lixiviados del relleno sanitario exceden ampliamente estos valores, lo cual incrementa el riesgo de infracciones normativas y potenciales sanciones ambientales, además de constituir un riesgo real para el ambiente local.

Este estudio se justifica, además, por sus beneficios sociales, técnicos y científicos. Entre los beneficiarios directos se encuentran el GAD Municipal de Latacunga y la Dirección de Gestión Ambiental, quienes podrán utilizar los resultados para fortalecer la planificación y el monitoreo ambiental.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

La presente investigación está orientada a resolver una problemática ambiental de gran relevancia para las comunidades asentadas en las inmediaciones del relleno sanitario objeto de estudio, así como para las autoridades locales responsables de la gestión integral de residuos sólidos. Por lo tanto, se identifican dos tipos de beneficiarios según la tabla 1. **Tabla 1.** *Beneficiarios del Proyecto*

Tipo de beneficiario	Nombre o grupo	Población estimada	Justificación del beneficio
Directo	GAD Municipal de Latacunga	240.000 personas	Entidad ejecutora del servicio de gestión de residuos sólidos. Este estudio fortalece su capacidad técnica para la planificación, seguimiento y control ambiental.
Directo	Dirección de Gestión Ambiental y Servicios Públicos de Latacunga	20 personas	Unidad técnica responsable de la operación y vigilancia del relleno Inchapo. Se beneficia de datos científicos para optimizar procesos y prevenir riesgos.
Directo	Operadora del relleno sanitario El Inchapo (personal técnico y operativo)	25 personas	Personal que maneja y controla las operaciones diarias del relleno. El estudio les proporciona insumos para mejorar prácticas técnicas y de seguridad ambiental.
Directo	Comunidad académica UTC – estudiantes de tesis, Ambiental	350 estudiantes	Estudiantes que podrán replicar, aplicar o ampliar la metodología usada para sus propios trabajos de titulación o proyectos de aula.
Indirecto	Habitantes de Eloy Alfaro	2.880 habitantes	Población directamente expuesta al posible impacto de lixiviados sobre suelos, cultivos y fuentes de agua. El estudio aporta elementos de alerta temprana y prevención.
Indirecto	Habitantes de Toacaso y otras parroquias rurales aledañas	3.000 habitantes	Poblaciones aguas abajo y dentro del área de influencia del relleno. Se benefician indirectamente de mejoras en gestión ambiental del sitio.
Indirecto	Usuarios del sistema de agua subterránea rural	6.000 personas aprox.	Grupos de la población rural que dependen de fuentes de agua susceptibles a contaminación. El estudio sirve para promover protección del recurso hídrico.

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La contaminación del agua subterránea causada por la infiltración de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios es considerada uno de los problemas ambientales más significativos en la gestión de residuos sólidos tanto a nivel global como nacional (Gómez Quispe, 2023). Los lixiviados, que son líquidos complejos generados por la percolación del agua a través de los residuos, contienen compuestos orgánicos, inorgánicos, sales disueltas y metales pesados potencialmente tóxicos (Villa, 2023). Cuando no se implementan sistemas de contención efectivos, estos líquidos pueden infiltrarse en el suelo, poniendo en riesgo los acuíferos y, en consecuencia, la salud pública, los ecosistemas y la disponibilidad de agua (Alvarado Figueroa, 2023).

En Ecuador, la generación de residuos sólidos urbanos supera los 4.8 millones de toneladas anuales, de las cuales aproximadamente el 76 % se disponen en rellenos sanitarios, mientras que el resto termina en botaderos a cielo abierto (INEC, 2022; MAATE, 2023). Aunque los rellenos sanitarios representan una mejora con respecto a los botaderos, existen numerosas deficiencias en su diseño, operación y monitoreo. Particularmente, la ausencia de sistemas de impermeabilización adecuados o el deterioro de las geomembranas permiten que los lixiviados traspasen las capas protectoras, alcanzando eventualmente los estratos inferiores del suelo y cuerpos de agua subterránea.

Este problema resulta especialmente preocupante en regiones como la provincia de Cotopaxi, donde el 60 % del abastecimiento de agua rural depende de pozos o vertientes subterráneas (SENAGUA, 2021). La vulnerabilidad del suelo a la infiltración, junto con una creciente presión urbana y un limitado control institucional, incrementan el impacto potencial de esta contaminación.

Investigaciones previas, como la realizada por Chamorro y López-Acosta (2016), han demostrado que la migración de los lixiviados puede representarse mediante modelos numéricos como CTRAN/W, los cuales simulan procesos de advección, dispersión y adsorción en medios porosos. Sin embargo, en el contexto ecuatoriano, el uso de estas herramientas es limitado, y son aún más escasos los estudios que validan los resultados de simulación con datos experimentales obtenidos en campo o laboratorio.

Entre las causas del problema se incluyen; las deficiencias en los sistemas de contención de rellenos sanitarios, junto con la falta de monitoreo de lixiviados y parámetros físico-químicos en el subsuelo, así como el desconocimiento del comportamiento real de los contaminantes bajo condiciones locales, generan efectos graves como la contaminación del agua subterránea con metales tóxicos (plomo, cadmio y cromo), la reducción de la capacidad productiva del suelo y

la afectación de la biodiversidad tanto del suelo como acuática, y riesgo acumulativo para comunidades que consumen agua de pozos no tratados.

A lo largo de las últimas décadas, los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) municipales de la provincia de Cotopaxi han enfrentado desafíos significativos en la gestión de los lixiviados generados por los rellenos sanitarios. Si bien el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente, ha impulsado la transición desde botaderos a cielo abierto hacia sistemas más controlados, ha jerarquizado la gestión de los residuos, esto no significa que no persistan limitaciones técnicas y presupuestarias que han dificultado la implementación de soluciones efectivas para el manejo y tratamiento de estos líquidos contaminantes. En muchos casos, la ausencia de infraestructura adecuada, como sistemas de impermeabilización y plantas de tratamiento, ha incrementado el riesgo de infiltración de lixiviados hacia los acuíferos subterráneos, lo que representa una amenaza para la salud pública y el entorno natural. Además, la falta de monitoreo sistemático y de programas de capacitación técnica ha restringido la capacidad de los GADs para evaluar y mitigar los impactos ambientales asociados, evidenciando la necesidad de fortalecer la gestión integral y la vigilancia ambiental en la provincia. En Latacunga el relleno sanitario cuenta con amplio sistema de tratamiento a lixiviados que son vertidos a cuerpos de agua dulce, según lo que requiere el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)

En vista de esto, se identifica una brecha técnica y científica en la evaluación del riesgo ambiental de los lixiviados, particularmente en la integración de análisis físico-químicos con modelación numérica a corto plazo. Este estudio propone un enfoque que combina datos experimentales con simulación predictiva, contribuyendo al mejoramiento del manejo ambiental de los rellenos sanitarios en Ecuador.

En tal virtud existe una problemática reflejada en el aspecto técnico el cual debe contar con actividades de contingencia en caso de infiltración de lixiviados, generando pasivos ambientales, y por ende costes de remediación de suelos y aguas subterráneas. Al tener resultados del comportamiento del lixiviado se puede prevenir estos casos de incidencia ambiental.

6. OBJETIVOS DEL PROYECTO

6.1. Objetivo General

Modelamiento de advección y dispersión de contaminantes presentes en el lixiviados en el relleno sanitario Inchapo Latacunga para determinar posibles afecciones a los niveles freáticos de aguas subterráneas en un periodo de 90 días.

6.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las condiciones físicas e hidrogeológicas del relleno sanitario para generar una base datos validada para los procesos del modelamiento.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos y metales pesados presentes en el lixiviado siguiendo Standar Methods para generar condiciones de frontera del modelamiento.
- Modelar el transporte de contaminantes en el suelo mediante la ecuación de advección, dispersión y reacción durante un periodo de 90 días, para contrastar los resultados de la simulación con datos experimentales para el análisis de errores cuadráticos medios y evaluar la validez del modelo matemático.

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

En el siguiente apartado se establece la planificación del trabajo realizado mediante las metodologías aplicadas para obtener los resultados finales, como se detalla en la tabla 2.

Tabla 2. *Actividades y sistema de tareas en relación con los objetivos planteados.*

Objetivo Específico	Metodología	Actividades	Resultados Esperados
1. Caracterizar las condiciones físicas e hidrogeológicas del relleno sanitario para generar una base datos validada para los procesos del modelamiento.	Diagnóstica – Descriptiva	- Levantamiento de información secundaria (planos, características constructivas del relleno). - Reconocimiento del sitio: ubicación, estratigrafía, nivel freático. - Análisis geotécnico básico del suelo (literatura y/o ensayos existentes).	Perfil técnico del sitio: geometría del relleno, propiedades del suelo y ubicación del acuífero.

2. Determinar los parámetros físicoquímicos y metales pesados presentes en el lixiviado para generar condiciones de frontera del modelamiento.	Cuantitativa – Experimental	- Toma de muestras de lixiviado en campo. - Análisis de laboratorio de parámetros físicoquímicos: pH, DBO5, DQO, CE, SST. - Análisis de metales pesados: Pb, Cd, Cr, As (entre otros).	Tabla de concentración de contaminantes; parámetros para alimentar el modelo numérico.
3. Modelar el transporte de contaminantes en el suelo mediante la ecuación de advección, dispersión y reacción durante un periodo de 90 días, para contrastar los resultados de la simulación con datos experimentales para el análisis de errores cuadráticos medios y evaluar la validez del modelo matemático.	Modelación Numérica – Método de Elementos Finitos Analítica – Comparativa Estadística descriptiva	- Construcción de modelo en SEEP/W para simular flujo de agua. - Acoplamiento con CTRAN/W para simular transporte. - Configuración de condiciones de frontera, dispersividad y parámetros del suelo. - Ejecución del modelo en un periodo de 90 días.	Mapas de concentración de contaminantes en distintos tiempos. Trayectoria y profundidad de la pluma contaminante.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA

La presente investigación se sustenta en fundamentos teóricos, técnicos y metodológicos propios de la ingeniería ambiental, la hidrogeología y la geotecnia aplicada al transporte de contaminantes en medios porosos. Su propósito es comprender y predecir el comportamiento de los lixiviados en el subsuelo, utilizando herramientas avanzadas de simulación numérica.

8.1. Relleno sanitario

Un relleno sanitario es una instalación diseñada para la disposición final de residuos sólidos, gestionada de manera controlada y segura para minimizar impactos ambientales como la contaminación del suelo, agua y aire, y proteger la salud pública.

8.2. Funcionamiento relleno sanitario

El funcionamiento de un relleno sanitario se basa en la implementación de técnicas y estructuras diseñadas para garantizar que los residuos sólidos sean manejados de manera segura y eficiente. Esto incluye la compactación de los desechos, la cobertura diaria con capas de tierra o materiales sintéticos, y la instalación de sistemas de drenaje para el control de lixiviados y gases producidos por la degradación orgánica. Además, se realizan monitoreos constantes para

prevenir riesgos ambientales y asegurar el cumplimiento de normativas que minimicen la contaminación y protejan los recursos naturales y la calidad de vida de las comunidades cercanas.

8.3. Lixiviados en un relleno sanitario

Los lixiviados en un relleno sanitario son líquidos que se generan como resultado de la descomposición de los residuos sólidos y la percolación del agua a través de los desechos acumulados. Estos líquidos contienen una mezcla compleja de compuestos orgánicos, inorgánicos y microorganismos, cuya composición depende de la naturaleza de los residuos y de las condiciones ambientales. Si no se gestionan adecuadamente, los lixiviados pueden infiltrarse en el suelo y las aguas subterráneas, causando contaminación ambiental y representando riesgos significativos para la salud pública.

La gestión de los lixiviados en rellenos sanitarios implica la implementación de sistemas de captación, tratamiento y monitoreo que minimicen su impacto ambiental. Estos sistemas incluyen barreras impermeables, drenajes especializados y plantas de tratamiento para reducir la carga contaminante antes de su disposición final. El diseño y la operación de estas estructuras son fundamentales para garantizar que los rellenos sanitarios funcionen de manera segura y sostenible, protegiendo los recursos hídricos y previniendo daños a los ecosistemas circundantes.

8.4. Flujo de lixiviado a través del relleno sanitario y subsuelo

El flujo de lixiviado a través de un relleno sanitario y el subsuelo representa un desafío complejo para la ingeniería ambiental. Este proceso ocurre cuando los líquidos generados por la descomposición de los residuos y la infiltración de agua se desplazan por las capas de desechos y el subsuelo circundante. La dinámica del flujo de lixiviado depende de factores como la composición de los residuos, la cantidad de agua presente, la permeabilidad del suelo y la capacidad de las barreras impermeables diseñadas para contener su movimiento. Sin un diseño adecuado, los lixiviados pueden escapar hacia zonas no controladas, generando contaminación de acuíferos y suelo, impactando negativamente en los ecosistemas y la salud pública.

Para modelar y gestionar el flujo de lixiviados, es esencial aplicar principios científicos como la advección, la dispersión y la difusión molecular. Estos procesos determinan cómo los contaminantes se transportan y se mezclan dentro del medio poroso del subsuelo. Por ejemplo, la advección facilita el movimiento de los lixiviados impulsados por dinámicas de flujo, mientras que la dispersión y la difusión contribuyen a la propagación de sus componentes

químicos en diversas direcciones. La integración de estos principios en herramientas de simulación numérica permite predecir el comportamiento del flujo de lixiviados y diseñar estrategias para minimizar sus impactos ecológicos y garantizar la sostenibilidad de los rellenos sanitarios.

8.5. Caracterización físico química de lixiviados

La caracterización físico-química del lixiviado de relleno sanitario es esencial para comprender su impacto ambiental y su potencial toxicidad. El lixiviado, una mezcla compleja generada a partir de la descomposición de residuos, varía en función de factores como la composición de los residuos, la edad y las condiciones ambientales.

8.5.1. Composición y Características

8.5.2. Componentes Orgánicos e Inorgánicos

El lixiviado típicamente contiene altos niveles de materia orgánica (relaciones de DOB_5/DQO alrededor de 0.63) y varios metales pesados, con concentraciones que frecuentemente superan los límites regulatorios (Irto et al., 2023; Rashid et al., 2022).

8.5.3. pH y Conductividad

Los valores de pH del lixiviado pueden variar de ácidos a neutros, influyendo en la solubilidad y toxicidad de los metales. La conductividad y los sólidos disueltos totales (TDS) también son indicadores críticos de la calidad del lixiviado (Chaudhary, 2022; Gomes et al., 2017).

8.5.4. Variaciones Estacionales

Impacto del Clima: Los cambios estacionales afectan significativamente la composición del lixiviado, observándose variaciones en parámetros como la alcalinidad y la conductividad eléctrica (Mohammadi et al., 2022). Por ejemplo, el lixiviado fresco a menudo muestra niveles más altos de contaminantes durante las estaciones húmedas debido al aumento de la percolación (Rashid et al., 2022).

8.5.5. Toxicidad y Riesgos Ambientales

Presencia de Metales Pesados: Los metales tóxicos comunes como Pb, Cr y Ni se encuentran frecuentemente en el lixiviado, lo que supone riesgos para la calidad del agua subterránea y superficial (Gomes et al., 2017). La interacción del lixiviado con cationes metálicos puede llevar a la formación de complejos, complicando los esfuerzos de remediación (Irto et al., 2023).

Si bien la caracterización del lixiviado es importante para la gestión ambiental, también es necesario considerar el potencial de avances tecnológicos en el tratamiento y la gestión del lixiviado. Métodos mejorados podrían mitigar los riesgos asociados con la contaminación por lixiviados, mejorando la sostenibilidad de las operaciones de rellenos sanitarios.

8.6. Transporte de contaminantes en medios porosos

8.6.1. Principios de advección, dispersión y difusión molecular.

Los principios de la advección, la dispersión y la difusión molecular son fundamentales para comprender el transporte de sustancias en diversos entornos. La advección se refiere al transporte de solutos por el movimiento masivo de un fluido, mientras que la difusión y la dispersión describen la propagación de sustancias debido a gradientes de concentración y variaciones de flujo, respectivamente (Marion, 2008). Estos procesos están interconectados y son cruciales para modelar el destino de contaminantes y nutrientes en los sistemas ecológicos.

8.6.2. Advección

La advección es el transporte de sustancias debido al movimiento de un fluido, impulsado por gradientes de presión o fuerzas de cuerpo (Corey & Auvermann, 2003). En aguas subterráneas, los contaminantes son transportados a la velocidad promedio del agua, que actúa como portadora (Bear & Verruijt, 1986). Es un mecanismo de transporte dominante en muchos contextos ambientales, particularmente en sistemas a gran escala (Chanson, 2004).

8.6.3. Difusión

La difusión es el proceso mediante el cual las moléculas se propagan desde áreas de alta concentración hasta áreas de baja concentración, impulsadas por gradientes de concentración (Corey & Auvermann, 2003). Este proceso obedece a la Ley de Fick, esta ley cuantifica la difusión, estableciendo que el flujo de partículas que es proporcional al gradiente de concentración (Yeh et al., 2023). En escala molecular se caracteriza por el movimiento aleatorio, observado en el movimiento browniano, y es esencial para comprender los fenómenos de mezcla a pequeña escala (Yeh et al., 2023).

8.6.4. Dispersión

La dispersión combina tanto la difusión molecular como los efectos de las variaciones de velocidad en un campo de flujo, lo que conduce a una propagación más amplia de sustancias (Holley, 1969). Incluye difusión turbulenta y dispersión longitudinal, que son influenciadas por la inclinación de los gradientes de concentración (Haynes & Vanneste, 2014). En el modelado

la ecuación de advección-dispersión (ADE) integra tanto la advección como la dispersión para modelar eficazmente la migración de solutos.

Aunque la advección, la difusión y la dispersión son procesos tratados a menudo como distintos, pueden interactuar de maneras complejas, lo que plantea desafíos para modelar con precisión los fenómenos de transporte en diversos campos científicos. Comprender estas interacciones es crucial para una gestión ambiental efectiva y el control de la contaminación.

8.7. Ecuación Advección–Dispersión–Reacción en rellenos sanitarios.

El transporte de contaminantes en rellenos sanitarios está gobernado por procesos físicos y químicos, entre los que destacan la advección, la dispersión y las reacciones químicas. Estos mecanismos determinan cómo los contaminantes migran a través de los residuos y los suelos circundantes, representando un riesgo potencial para las aguas subterráneas y los ecosistemas (Wuana et al., 2021). El modelamiento preciso de estos procesos es fundamental para diseñar sistemas de contención eficaces y estrategias de remediación. A continuación, se detallan los componentes principales de estas ecuaciones, sus soluciones y sus aplicaciones en la gestión de rellenos sanitarios.

8.7.1. Mecanismos de advección: Transporte por Flujo de Fluidos

La advección corresponde al movimiento de contaminantes disueltos arrastrados por el flujo de lixiviados. Este proceso está dominado por gradientes hidráulicos y se describe mediante la Ley de Darcy:

La Ley de Darcy establece que el flujo de un fluido a través de un medio poroso es proporcional al gradiente de presión hidráulica y se expresa matemáticamente como:

$$Q = - K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- Q: Flujo volumétrico del fluido (m³/s).
- K: Conductividad hidráulica del medio poroso (m/s).
- A: Área transversal del flujo (m²).
- dh/dL : gradiente hidráulico (m/m)
- L: Longitud del medio poroso en la dirección del flujo (m).
- h: altura del medio poroso en dirección perpendicular (m)

Esta fórmula es fundamental para describir el transporte de lixiviados en rellenos sanitarios y otros sistemas hidrogeológicos.

8.7.2. Mecanismo de dispersión: Mezcla y Difusión

La dispersión incluye dos componentes principales:

- **Dispersión mecánica** (debida a variaciones en la velocidad del flujo en medios porosos),
- **Difusión molecular** (ocasionada por gradientes de concentración).

El efecto combinado se modela mediante la Ecuación de Advección-Dispersión (EAD):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ec 2.}$$

donde:

C = concentración del contaminante [kg/m^3], D =
coeficiente de dispersión hidrodinámica [m^2/s], v =
velocidad promedio del fluido [m/s].

Esta ecuación permite predecir la evolución espacial y temporal de plumas de contaminantes (Booker & Rowe, 1987).

8.8. Dinámica de Reacciones: Degradación y Sorción

Las concentraciones de contaminantes pueden modificarse debido a procesos reactivos, tales como:

- Degradación de primer orden, puede ser biodegradación, hidrólisis:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\lambda C \quad \text{Ec. 3}$$

donde λ = constante de degradación [$1/\text{s}$].

- Sorción, algunos fenómenos relacionados son; retardo por interacción con partículas del suelo:

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad \text{Ec. 4}$$

siendo

R = factor de retardo, ρ_b

= densidad aparente,

K_d = coeficiente de distribución y

θ = porosidad.

Estas reacciones se integran en la EAD, dando lugar a la Ecuación de Advección-Dispersión-Reacción (EADR), esencial para modelar el transporte de contaminantes a largo plazo (De, 2000).

8.9. Retardo del contaminante y coeficiente de distribución K_D y K_d .

El retardo de contaminantes y el coeficiente de distribución K_D son conceptos críticos para comprender la dinámica de los contaminantes en diversos entornos. El retraso de contaminantes se refiere al desfase temporal en la respuesta de las concentraciones de contaminantes a los cambios en las fuentes de emisión, mientras que el coeficiente de distribución K_D cuantifica la partición de los contaminantes entre diferentes fases como aire, suelo y agua. Estos conceptos son esenciales para modelar y predecir la dispersión y el destino de los contaminantes.

8.9.1. Retraso de Contaminantes

El retraso de contaminantes abarca el tiempo requerido para que los contaminantes se acumulen o disipen en un entorno dado debido a factores que incluyen mecanismos de transporte y condiciones ambientales (Leandri & Augeraud-Véron, 2012). La inclusión de retrasos distribuidos en los modelos de control de contaminación altera significativamente las trayectorias óptimas de contaminación, influyendo en el momento y la efectividad de las estrategias de mitigación (Leandri & Augeraud-Véron, 2012).

8.9.2. Coeficiente de Distribución K_D

El coeficiente de distribución K_D es crucial para comprender la migración de los contaminantes a través de diversos medios. Afecta la disponibilidad y toxicidad de los contaminantes en suelos y agua (Durães et al., 2017). Diversas técnicas de modelado, incluyendo la ecuación de advección-difusión y modelos semi-analíticos, incorporan K_D para simular con precisión la redistribución y el transporte de los contaminantes (Naizabayeva et al., 2024; Liu et al., 2024).

Si bien centrarse en el retraso de contaminantes y K_D es vital para una gestión ambiental efectiva, también es importante considerar las limitaciones de los modelos actuales, que pueden

no capturar completamente las complejidades de las interacciones de contaminantes en el mundo real y las respuestas ambientales.

8.10. Soluciones Analíticas y Numéricas

8.10.1. Soluciones Analíticas

En condiciones simplificadas, flujo estacionario, medio homogéneo, las soluciones analíticas de la EADR permiten estimar la dispersión de contaminantes. Algunos ejemplos incluyen:

Solución de Ogata-Banks (para inyección continua de contaminantes), solución de Bear (para emisiones puntuales).

Estas aproximaciones son útiles en evaluaciones preliminares de riesgo (Booker & Rowe, 1987).

8.11. Modelamiento Numérico

En escenarios realistas como, por ejemplo, suelos heterogéneos, flujo transitorio, se emplean métodos numéricos. Las herramientas más utilizadas son; Métodos de Elementos Finitos (COMSOL Multiphysics), Diferencias Finitas (MODFLOW/MT3DMS), Aprendizaje Automático (para optimización de parámetros). Estos modelos permiten simular escenarios complejos, como fugas en barreras o transporte reactivo en arcillas.

8.12. Factores que afectan la movilidad de contaminantes.

La movilidad de los contaminantes en los suelos está influenciada por diversos factores físicos y químicos que interactúan de manera compleja. La textura del suelo, por ejemplo, determina la porosidad y la capacidad de retención de agua, afectando directamente el transporte de contaminantes (Černohlávková, 2021). El pH del suelo juega un papel crucial, ya que influye en la solubilidad y la especiación química de los compuestos contaminantes, dictando si permanecen en forma soluble o precipitada. Además, el contenido de materia orgánica es otro factor significativo, ya que puede formar enlaces con contaminantes, limitando su movilidad o, en algunos casos, facilitando su transporte a través de la formación de complejos solubles. Todos estos elementos deben considerarse cuidadosamente para desarrollar modelos predictivos precisos y estrategias efectivas de remediación ambiental.

8.13. Diferencias entre transporte en suelos saturados frente a suelos no saturados.

El transporte de contaminantes en suelos saturados difiere de los no saturados por sus características físicas y químicas. En suelos saturados, el agua fluye principalmente a través de los poros llenos de líquido, facilitando un transporte uniforme de los contaminantes disueltos.

En suelos no saturados, los poros contienen aire además de agua, influenciando el transporte por adsorción, evaporación y tensión superficial. Estas condiciones generan dispersión más compleja y requieren modelos predictivos más detallados para entender la movilidad de los contaminantes (Viccione et al., 2020).

8.14. Fundamentos del método de elementos finitos en simulación hidrogeológica y Modelación acoplada de flujo y transporte.

El método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta fundamental en la simulación hidrogeológica, especialmente para modelar procesos acoplados de flujo y transporte en medios porosos heterogéneos. Este método permite representar con precisión condiciones subsuperficiales complejas, posibilitando la simulación de la dinámica multifásica de fluidos y el transporte de contaminantes. A continuación, se describen aspectos clave del método de elementos finitos en este contexto.

8.14.1. Fundamentos del método de elementos finitos

- Método de Volúmenes Finitos centrado en nodos: Esta aproximación integra los métodos de volúmenes finitos y de elementos finitos para modelar el flujo de fluidos en medios geológicos, adaptándose a variaciones de permeabilidad y porosidad en distintas escalas (Geiger et al., 2021).
- Método Generalizado de Elementos Finitos Multiescala (GMsFEM): El GMsFEM facilita la conservación de masa en simulaciones de flujo y transporte acoplados, utilizando funciones base multiescala para abordar de manera eficiente medios heterogéneos (Chung et al., 2021).

8.14.2. Modelación acoplada de flujo y transporte

- Método de Elementos Finitos Totalmente Mixto Aumentado: Este método acopla las ecuaciones de Stokes con problemas de transporte, permitiendo subespacios flexibles de elementos finitos y garantizando la estabilidad sin condiciones inf-sup discretas (Gatica & Inzunza, 2020).
- Método Mixto de Elementos Finitos con Velocidades Mejoradas: Esta técnica modela el flujo levemente compresible y el transporte químico, demostrando eficiencia computacional en aplicaciones como la biorremediación y el transporte de contaminantes (Thomas & Wheeler, 2011).
- Métodos Continuos y Discontinuos de Elementos Finitos: Estas metodologías abordan el flujo acoplado superficial-subsuperficial, empleando técnicas discontinuas de penalización interior Galerkin para simulaciones robustas en medios fracturados (Cesmelioglu et al., 2010).

Si bien el método de elementos finitos proporciona un marco robusto para la simulación hidrogeológica, persisten desafíos para captar con precisión las complejidades de las

condiciones subsuperficiales, especialmente en ambientes altamente heterogéneos. Se requiere investigación adicional para mejorar la adaptabilidad y eficiencia de estos métodos en aplicaciones reales.

8.15. Parámetros de entrada: dispersividad, contenido de agua, condiciones de frontera, tipo de contaminante y validación y calibración de modelos numéricos.

Los parámetros de entrada para los modelos de transporte de contaminantes son fundamentales para simular con precisión el comportamiento de los contaminantes en sistemas de aguas subterráneas. Entre los principales parámetros se incluyen la dispersividad, el contenido de agua, las condiciones de frontera y el tipo de contaminante, los cuales influyen de manera conjunta en la capacidad predictiva del modelo. A continuación, se detallan estos aspectos.

8.15.1. Parámetros de entrada

Dispersividad: Este parámetro cuantifica la dispersión de los contaminantes en el subsuelo. Las variaciones en la dispersividad pueden afectar de forma significativa los patrones de migración de los contaminantes (Chetti, 2024).

Contenido de agua: El contenido de agua saturada y residual es crucial para determinar el flujo y el transporte de contaminantes, siendo el contenido de agua saturada a menudo la variable más significativa en zonas no saturadas (Boateng & Cawlfeld, 2022).

Condiciones de frontera: Estas definen los límites del modelo y pueden incluir concentraciones o flujos fijos, lo que resulta esencial para simular escenarios realistas (Binning & Celia, 2022).

Tipo de contaminante: Diferentes contaminantes presentan comportamientos particulares según sus propiedades químicas, lo que afecta las tasas de transporte y degradación (Sadrnejad & Memarianfard, 2017).

8.15.2. Validación y calibración de modelos

La calibración consiste en ajustar los parámetros del modelo para adecuarlos a los datos observados, empleando con frecuencia técnicas como el algoritmo de Metropolis-Hastings para asegurar la identificabilidad de los parámetros (Hamer et al., 2022).

La validación se logra al comparar las predicciones del modelo con observaciones del mundo real, garantizando que el modelo represente con precisión el comportamiento de los contaminantes a lo largo del tiempo (Hamer et al., 2022).

8.15.3. Limitaciones del modelo

Escalabilidad: Es posible que los modelos tengan dificultades para simular de manera precisa el transporte de contaminantes a gran escala debido a restricciones computacionales (Sadrnejad & Memarianfard, 2017).

Sensibilidad: Algunos parámetros, como la conductividad hidráulica y la dispersividad, pueden influir considerablemente en los resultados del modelo, por lo que su selección cuidadosa es indispensable (Sadrnejad & Memarianfard, 2017).

Simplificaciones: Los modelos suelen basarse en supuestos que pueden no captar todas las complejidades de los escenarios reales, lo que potencialmente puede provocar imprecisiones (Boateng & Cawlfeld, 2022).

Si bien estos modelos ofrecen información valiosa sobre el transporte de contaminantes, su efectividad puede verse limitada por las incertidumbres inherentes a los parámetros de entrada y las simplificaciones realizadas durante la modelación. Esto resalta la necesidad de una mejora y validación continua de los modelos numéricos para incrementar su

8.16. Propiedades hidráulicas del suelo y su influencia

Las propiedades hidráulicas del suelo, incluyendo las curvas de retención de humedad y la conductividad hidráulica, resultan fundamentales para comprender el movimiento del agua en los suelos. Dichas propiedades están influenciadas por factores como la compactación del suelo, la porosidad y modelos empíricos como el de van Genuchten-Mualem. Estudios recientes han profundizado en estos aspectos, aportando información sobre cómo interactúan y afectan el comportamiento del suelo.

8.16.1. Curva de retención de humedad

La curva de retención de humedad es una propiedad básica que describe cómo el agua se retiene en el suelo a diferentes tensiones. Por lo general, se modela utilizando el modelo de van Genuchten, el cual ha sido modificado para mejorar las predicciones en suelos con texturas finas (Kuang et al., 2021).

Esta curva es esencial para prever la conductividad hidráulica no saturada, la cual es crucial para modelar el flujo de agua en suelos no saturados (Abbaspour et al., 2011).

8.16.2. Conductividad hidráulica saturada y no saturada

La conductividad hidráulica saturada se ve significativamente afectada por la compactación del suelo, donde una compactación intensa puede reducir la conductividad hasta en un 81% en comparación con suelos no compactados (Schwen et al., 2011).

La conductividad hidráulica no saturada puede preverse mediante modelos como Mualem-Van Genuchten y Brooks-Corey, mostrando este último una mejor correlación en suelos compactados (Abbaspour et al., 2011).

Modelos empíricos: van Genuchten–Mualem

El modelo Van Genuchten-Mualem (VGM) es ampliamente empleado para predecir propiedades hidráulicas del suelo. Sin embargo, puede subestimar la conductividad hidráulica relativa en suelos de textura fina, lo que ha llevado a la realización de modificaciones para mejorar su precisión (Kuang et al., 2021).

Los parámetros del modelo VGM pueden obtenerse a partir de conjuntos de datos de alta calidad, que incluyen información de retención de agua y conductividad hidráulica a lo largo de una amplia gama de texturas de suelo (Hohenbrink et al., 2023; "Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range", 2023).

Relación entre compactación, porosidad y capacidad de adsorción

La compactación afecta la porosidad del suelo al reducir la cantidad de microporos y alterar el espacio poroso, lo que a su vez incide en las propiedades de conducción de agua (Schwen et al., 2011).

Un incremento en la compactación da lugar a una mayor proporción de mesoporos, lo que puede mejorar la retención de agua, pero reducir la conductividad hidráulica total (Schwen et al., 2011).

Si bien el modelo Van Genuchten-Mualem es una herramienta sólida para predecir propiedades hidráulicas del suelo, sus limitaciones en ciertos tipos de textura resaltan la necesidad de una continua mejora y validación frente a datos empíricos. La interacción entre compactación, porosidad y propiedades hidráulicas subraya la complejidad del comportamiento del suelo y la importancia de prácticas de manejo adaptadas en contextos agrícolas y ambientales.

8.17. Atenuación y reacciones químicas en el suelo

El suelo desempeña un papel fundamental en la atenuación de contaminantes a través de diversos mecanismos, entre los que se incluyen la adsorción reversible, la biodegradación, la retención de metales pesados y la influencia del pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Estos procesos resultan esenciales para comprender cómo los contaminantes interactúan con el suelo y cuál es su destino final en el ambiente.

8.17.1. Adsorción reversible de contaminantes

Los contaminantes pueden adherirse a las partículas del suelo mediante la adsorción reversible, proceso influenciado por la composición del suelo y la naturaleza química de los contaminantes (Blasioli et al., 2009). Las isotermas de adsorción, como las de Freundlich y Langmuir, permiten cuantificar la capacidad de fijación del suelo para distintos solutos (Mohamed & Paleologos, 2017).

8.17.2. Biodegradación de compuestos orgánicos

La actividad de los microorganismos del suelo resulta clave en la biodegradación de contaminantes orgánicos, transformándolos en sustancias menos dañinas (Yong & Mulligan, 2023). Factores como la humedad, la temperatura y el contenido de materia orgánica influyen de manera significativa en la actividad microbiana y en las tasas de degradación (Yaron et al., 2011).

8.17.3. Retención y adsorción de metales pesados

Los metales pesados se retienen en el suelo principalmente a través de procesos de sorción y adsorción, los cuales dependen del pH del suelo y de la presencia de materia orgánica (Violante et al., 2010). La biodisponibilidad de estos metales está determinada por su especiación química, que puede variar en función de los cambios en el pH (Blasioli et al., 2009).

8.17.4. Influencia del pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El pH del suelo tiene un impacto significativo en la solubilidad y movilidad de los contaminantes, ya que condiciones ácidas suelen aumentar la solubilidad de los metales (Violante et al., 2010). La CIC es determinante para la retención de nutrientes y la fijación de contaminantes, lo que afecta la dinámica general de estos en el suelo (Mohamed & Paleologos, 2017).

Si bien estos mecanismos evidencian la capacidad del suelo para mitigar la contaminación, es importante reconocer que no todos los contaminantes se atenúan de manera eficiente. Algunos

pueden persistir o incluso acumularse, representando riesgos a largo plazo para la salud del suelo y los ecosistemas.

8.18. Propiedades hidráulicas del suelo y caracterización del relleno sanitario

El comportamiento del suelo frente a la infiltración de lixiviados está influido por su conductividad hidráulica, la curva de retención de humedad y el contenido de agua residual. Diversos estudios recurren a modelos como el de van Genuchten–Mualem para describir las funciones de retención y la conductividad hidráulica en medios no saturados, particularmente en contextos donde hay presencia de materiales finos como limos o arcillas (Wu et al.). 2021; López-Acosta & Mendoza, 2021).

Además, los lixiviados se caracterizan por su alta carga contaminante, que incluye metales pesados y compuestos orgánicos en concentraciones que, a menudo, exceden los límites permisibles determinados por la OMS y las normativas ambientales locales. La caracterización físico-química de estos en laboratorio permite definir las condiciones iniciales de concentración que sirven como datos de entrada para el modelo numérico.

8.19. Teoría del transporte de contaminantes en medios porosos

El transporte de contaminantes en el suelo y subsuelo es un fenómeno gobernado principalmente por dos procesos físicos: advección y dispersión. La advección se refiere al movimiento de los contaminantes junto con el flujo del agua en el medio poroso, mientras que la dispersión incluye tanto la mezcla mecánica como la difusión molecular del contaminante. A estos procesos se suman mecanismos de atenuación, como la adsorción, en donde el contaminante se adhiere parcialmente a las partículas del suelo, disminuyendo su concentración en la fase acuosa (Sheu & Chen, 2002; Chamorro & López-Acosta, 2016).

Para describir matemáticamente estos fenómenos, se utilizan ecuaciones diferenciales del tipo advección–dispersión–reacción (ADR), las cuales permiten modelar la evolución espaciotemporal de la concentración del contaminante bajo ciertas condiciones de frontera y propiedades del medio.

El transporte de contaminantes en el suelo y subsuelo se define principalmente por dos procesos físicos: la advección y la dispersión. La advección hace referencia al movimiento de los contaminantes junto con el flujo del agua a través del medio poroso, mientras que la dispersión incluye tanto la mezcla mecánica como la difusión molecular del contaminante. Además de estos procesos, existen mecanismos de atenuación, como la adsorción, donde el contaminante

se adhiere parcialmente a las partículas del suelo, lo que reduce su concentración en la fase acuosa (Sheu & Chen, 2021; Chamorro & López-Acosta, 2021).

8.20. Aplicación a la gestión ambiental y toma de decisiones

La integración entre análisis de laboratorio y simulación numérica proporciona una herramienta poderosa para la evaluación del riesgo ambiental en sitios de disposición final de residuos. Además, permite fundamentar técnicamente la implementación de medidas de remediación, rediseño de sistemas de contención, o políticas de monitoreo permanente. Esta fundamentación no solo enriquece el conocimiento científico, sino que aporta soluciones prácticas en línea con los principios de sostenibilidad y prevención de la contaminación, priorizados por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6, 11 y 13).

8.21. Límites máximos permisibles de presencia de contaminantes en el suelo.

El Anexo 1 Tabla 8 del Libro VI del acuerdo ministerial 097A, correspondiente a la “Norma de calidad ambiental del recurso agua y descargas”, establece los parámetros y límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales al sistema de alcantarillado público. Esta normativa tiene como objetivo proteger la calidad del agua y el funcionamiento adecuado de los sistemas de tratamiento, regulando la concentración de contaminantes como sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, metales pesados y otros compuestos específicos. El cumplimiento de estos límites es fundamental tanto para prevenir la contaminación ambiental como para garantizar la sostenibilidad de los cuerpos hídricos receptores, alineándose con los principios de prevención y control de la contaminación establecidos en la legislación ambiental vigente.

9. HIPOTESIS

Al ser una investigación enfocada a aplicar una metodología cuantitativa, se planteó una hipótesis nula y alternativa, donde las variables que se analizaron comprenden las concentraciones de DQO, DBO, fenoles fosfatos y nitrógeno, en función al tiempo y al comportamiento a través del fenómeno de transporte de contaminantes.

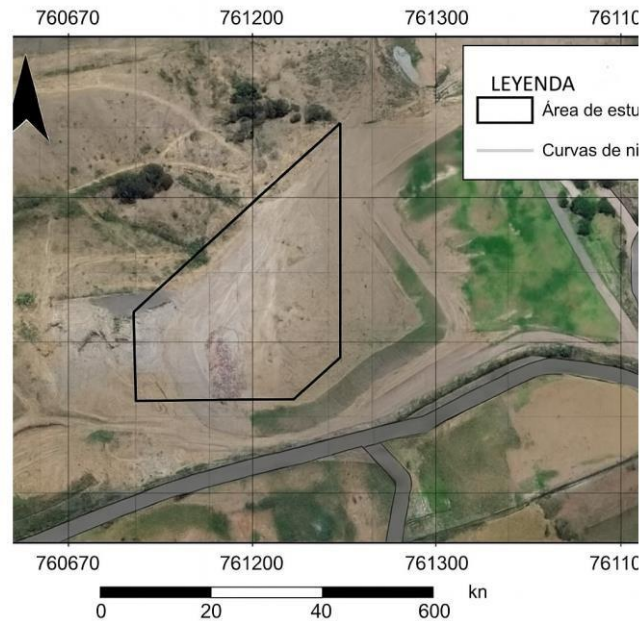
Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas en el comportamiento de transporte de los contaminantes (DQO, DBO, Nitrógeno, Fósforo y Fenoles) en el suelo franco limoso del relleno sanitario de Latacunga.

Hipótesis alternativa (H_1): Existen diferencias significativas en el comportamiento de transporte de los contaminantes (DQO, DBO, Nitrógeno, Fósforo y Fenoles) en el suelo franco limoso del relleno sanitario de Latacunga.

10. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se enfoca en el relleno Sanitario ubicado en el sector de Inchapo, Parroquia Eloy Alfaro del Cantón Latacunga, justo en sus celdas emergentes, donde se procede a tomar las muestras para realizar el análisis de transporte de contaminantes. Se observa el área de estudio en la figura 1.

Figura 1. Área de estudio



11. METODOLOGÍA

11.1. Tipo y enfoque de Investigación

En este apartado se define la estructura fundamental para realizar la investigación y la obtención de los resultados en base a los datos colectados. En la siguiente tabla se detalla el procedimiento metodológico, según la tabla 3.

Tabla 3. Estructura del proceso de Investigación

Categoría	Definición aplicada al estudio
Tipo de investigación	Modelamiento aplicado, porque busca entender el fenómeno de infiltración de un lixiviado en el suelo caso de existir una falla en el sistema de impermeabilización.
Enfoque	Cuantitativo, ya que se basa en datos medibles de laboratorio y simulación numérica.
Diseño	Diagnóstico – Descriptivo. Analiza una situación existente, riesgo de contaminación, además, describe el comportamiento del sistema y busca correlaciones entre datos experimentales y simulados.
Temporalidad	Transversal, con simulación de condiciones a corto plazo (90 días).

11.2. Etapas metodológicas del proyecto de investigación

Para poder realizar la investigación del sobre el relleno sanitario del Inchapo, se plantea una metodología investigativa que abarca un trabajo de recopilación directa de datos fundamentales para la simulación, este trabajo se lo realiza en diferentes etapas

11.2.1. Objetivo 1: Recolección de información del sitio

Datos sobre el levantamiento topográfico y caracterización geotécnica e hidrogeológica del área del relleno sanitario, para establecer las condiciones de frontera necesarias.

- Recopilación de datos climáticos: precipitación, temperatura, evapotranspiración.
- Identificación del diseño del sistema de impermeabilización y drenaje del relleno.
- Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero subyacente.

11.3. Objetivo 2: Muestreo y análisis físico-químico de lixiviados

Con el objetivo de caracterizar la calidad del lixiviado generado en el relleno sanitario, se realizó un análisis de laboratorio de parámetros fisicoquímicos clave, los cuales permiten establecer el nivel de carga orgánica, presencia de sales, compuestos tóxicos y condiciones generales del efluente. Estos resultados fueron utilizados como insumo para la modelación del transporte de contaminantes y para evaluar el cumplimiento de normativas ambientales.

11.3.1. Muestreo de lixiviado

La toma de muestras se realiza en el punto de captación principal del sistema de recolección de lixiviados del relleno sanitario, utilizando frascos de vidrio esterilizados con capacidad de 1 L. Las muestras se conservan a una temperatura de 4 °C y su transporte es bajo cadena de custodia al laboratorio acreditado en la ciudad de Quito ALS, Ecuador. Las condiciones del muestreo se ajustan a los lineamientos del Manual de Muestreo del EPA y de la norma INEN 2169. El monitoreo se realiza las primeras semanas de cada mes según el protocolo establecido en el registro ambiental de EPAGAL MAE-12567-2014. Adicional a aquello los resultados presentados son el promedio de cada mes monitoreado, según la fórmula estandarizada para estadística descriptiva. Por lo descrito anteriormente se actúa con una frecuencia de muestreo mensual lo que suma 4 muestras puntuales con réplicas de 3 veces y un testigo.

11.3.2. Parámetros analizados y métodos aplicados

Los análisis fisicoquímicos se realizaron siguiendo los protocolos establecidos por *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, según se detalla en la Tabla 4. Se

empleó espectrofotometría UV-Visible para la determinación de parámetros como DQO, DBO, nitrógeno total y fenoles. La cuantificación de metales pesados se realizó mediante espectrometría de absorción atómica (AAS), conforme a los métodos recomendados en la normativa técnica vigente, según el detalle establecido en la tabla 4.

Tabla 4. *Métodos para los parámetros fisicoquímicos del lixiviado*

Parámetro	Método de Referencia	Técnica Analítica y Equipo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	SM 5210 B, Ed. 24, 2023	Winkler, electrometría
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	SM 5220 A y 5220 D, Ed. 24, 2023	Espectrofotometría UV-Vis
Fenoles	SM 5530 A y 5530 C, Ed. 24, 2023	Espectrofotometría UV-Vis
Sólidos Totales	SM 2440 A y 2540 B, Ed. 24, 2023	Gravimetría
Metales ICP alto	SM 3210 B, Ed. 24, 2023	Espectroscopia de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado

Nota: SM denota la abreviación de Estándar Methods para los análisis de laboratorio

De estos resultados se escoge los que no están de acorde a las regulaciones legales vigentes del Ecuador en cuanto a calidad de agua para despacho a cuerpos hídricos, cabe recalcar que la contaminación inicial para la simulación es la concentración del contaminante que no cumple en ppm o mg/L según el estudio realizado por Chamorro C., & López N. (2016), argumento que se asemeja al contexto analizado, enfocado en el transporte de contaminantes de lixiviados de rellenos sanitarios de Mérida.

11.3.3. Validación estadística de los datos

A los resultados obtenidos por las réplicas se aplica los que es un análisis de varianza anova que permitirá a estos conjuntos de datos generar una validez para el proceso de modelado.

11.4. Objetivo 3: Modelación numérica del transporte de contaminantes

□ Software utilizado:

GeoStudio es un conjunto de herramientas especializadas para la modelación numérica en geotecnia e ingeniería ambiental. Sus módulos SEEP/W y CTRAN/W permiten simular, respectivamente, el flujo de agua en medios no saturados y el transporte de contaminantes a través de suelos. Estos programas ofrecen un entorno intuitivo para definir geometrías, parámetros del suelo y condiciones de frontera, facilitando el análisis detallado de escenarios en proyectos de ingeniería relacionados con la gestión de agua y residuos.

11.4.1. Modelado del flujo de agua (SEEP/W)

- Definición de la geometría del perfil del relleno y del suelo subyacente.
- Parámetros hidráulicos del suelo:
 - Conductividad hidráulica saturada y no saturada.
 - Contenido de agua residual y saturado.
 - Curva característica de retención
 - Condiciones de frontera:
 - Límite superior: flujo impuesto (precipitación/infiltración).
 - Límite inferior: nivel freático.
- Cálculo del régimen de flujo para un periodo de 90 días.

11.4.2. Modelado del transporte de contaminantes (CTRAN/W)

- Tipo de análisis: advección–dispersión.
- Parámetros de entrada:
 - Concentración inicial del lixiviado (valores obtenidos en laboratorio).
 - Dispersividad longitudinal y transversal.
 - Velocidades de flujo obtenidas del modelo SEEP/W.
 - Coeficiente de degradación.
 - Coeficiente de retardo.

- Tiempo de simulación: 90 días.

11.4.3. Salidas del modelo:

- Mapas de concentración del contaminante por intervalo de tiempo. ○
Trayectoria de la pluma contaminante.
- Posible punto de llegada al acuífero o zona de riesgo.

11.5. Instrumentos y materiales requeridos

En la siguiente tabla se describen los instrumentos y materiales que se utilizan en la investigación.

Tabla 5. *Recolección de datos*

Herramienta	Aplicación
Frascos de muestreo estériles	Recolección de lixiviados
AAS / ICP-OES	Determinación de metales
Kit DQO/DBO5	Análisis de materia orgánica
GeoStudio (licencia o demo)	Simulación numérica
Hojas de cálculo / software estadístico	Análisis de datos y comparación

11.6. Normativas y referencias técnicas

- AM 097A, anexo 1 tabla 8
- EPA SW-846 (métodos analíticos para residuos sólidos)
- APHA Standard Methods (2023)
- Manual de usuario de CTRAN/W y SEEP/W (GeoSlope International Ltd.)

11.6.1. Control de calidad analítica

Todos los ensayos fueron realizados por personal calificado bajo condiciones controladas en laboratorio acreditado. Se aplicaron blancos de reactivos, estándares de calibración y duplicados para asegurar la trazabilidad y precisión de los datos. Los límites máximos permisibles del país se comparan conforme a los estándares del Acuerdo Ministerial 097A y ediciones más recientes de los Standard Methods for the Examination of Wáter and Wastewater.

11.7. Tratamiento de resultados

Los valores obtenidos se registran en una matriz comparativa, donde se contrastan con los límites permisibles establecidos por el Acuerdo Ministerial 097A, anexo uno y tabla 8, a fin de

identificar el nivel de riesgo y toxicidad del lixiviado. Posteriormente, se integraron como parámetros de entrada en el modelo numérico CTRAN/W para simular el transporte de los contaminantes en el suelo durante un periodo de 90 días.

11.7.1. ANOVA del modelo

El Análisis de Varianza (ANOVA) es una herramienta estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos de datos. En el contexto de esta investigación, el ANOVA se aplicó a las concentraciones de los principales contaminantes del lixiviado (DQO, DBO, Nitrógeno, Fósforo y Fenoles) obtenidas tanto en los análisis físico-químicos como en los valores simulados con CTRAN/W, con el objetivo de validar si el comportamiento de transporte de cada contaminante es significativamente diferente en el subsuelo.

El procedimiento consistió en considerar cada contaminante como un grupo independiente y comparar sus valores promedio (mg/L) registrados en diferentes tiempos (abril, mayo y junio) con sus respectivas variaciones, metodología aplicada por Chamorro C., & López N (2021). El ANOVA de una vía permitió contrastar la hipótesis nula (H_0) —que establecía que todos los contaminantes presentan un comportamiento similar durante el transporte en el suelo— frente a la hipótesis alternativa (H_1) —que planteaba diferencias significativas en dicho comportamiento.

11.7.2. Estadística descriptiva

11.7.3. Cálculo de medidas de tendencia central

Según el estudio realizado por Sandström et al., (2023) se utilizó estas medidas para validar los datos estudiados a través de la caracterización físico química.

- **Media aritmética (promedio):** Indica la concentración promedio de cada contaminante, representando el nivel general de carga contaminante.
- **Mediana:** Útil para detectar asimetrías, mostrando el valor central que divide la mitad superior e inferior de las mediciones.
- **Moda:** Permite identificar el valor que se repite con mayor frecuencia, aunque en este tipo de datos suele ser menos relevante.

11.7.4. Medidas de dispersión

- **Rango (máx.–mín.):** Indica la variabilidad entre las concentraciones máximas y mínimas medidas.
- **Varianza y Desviación estándar (σ):** Refleja cuánto se alejan las mediciones de la media; valores altos implican mayor variabilidad en las mediciones (útil para evaluar la estabilidad del sistema de muestreo).
- **Coefficiente de variación (CV%):** $(\sigma/\mu \times 100)$ muestra la dispersión relativa, permitiendo comparar contaminantes con rangos de concentración muy distintos (por ejemplo, DQO en miles de mg/L frente a fenoles en décimas de mg/L).

11.7.5. Representación gráfica

- **Box plots:** Permite visualizar la distribución de los datos, detectar valores atípicos y comparar la variabilidad entre los diferentes contaminantes.

11.7.6. Interpretación ambiental

- Un CV alto en DQO o DBO podría indicar cambios en la composición del lixiviado entre muestreos, mientras que un CV bajo en fenoles sugiere concentraciones más estables.
- Los valores promedio se comparan con los límites permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A, destacando qué parámetros superan la normativa y requieren atención prioritaria.

11.7.7. Validación de simulación vs datos reales

El objetivo de este proceso es validar la simulación del modelo CTRAN/W frente a datos reales, por consiguiente, se aplican las siguientes herramientas:

Tabla 6. *Herramientas de validación de datos*

Herramienta	Requiere	Aplicación
Error absoluto medio (MAE)	Datos simulados vs reales	Evalúa qué tan lejos estás de los valores reales
Error cuadrático medio (RMSE)	Ídem	<u>Penaliza más los errores grandes</u>
Error porcentual absoluto medio (MAPE)	Ídem	Da error relativo en %
Gráfico de dispersión	Visual	Simulado vs real, para ver tendencia o ajuste lineal

Índice de desempeño (NashSutcliffe Efficiency) ≥ 3 pares Mide la eficiencia del modelo

Se establece la fórmula de error cuadrático medio que se aplica a los resultados del muestreo puntual en la zona de lixiviados

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{sim\ i} - C_{obs,\ i})^2} \quad \text{Ec.5}$$

Donde:

n: número de muestras analizadas C_{sim}

i: Concentración simulada

$C_{obs\ i}$: concentración Observada

12. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

El ANOVA de una vía realizado para las concentraciones de los contaminantes ($F = 3259,8$; $p < 0,05$) permitió rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa. Este resultado estadístico concuerda con los hallazgos obtenidos en las simulaciones numéricas y el análisis físico-químico, fortaleciendo la validez de las conclusiones:

Por lo que, se rechaza hipótesis nula que respalda la conclusión de que los contaminantes del lixiviado presentan comportamientos de transporte significativamente distintos, los fenoles pesar de encontrarse en concentraciones traza 0,26 mg/L, mostraron un comportamiento notablemente diferente por su alta solubilidad y baja adsorción, con un avance vertical de 1 m en tres meses, lo cual exige estrategias de monitoreo y tratamiento diferenciadas. Otro caso es el DQO (Yu et al., 2018), que presentó la mayor persistencia y dispersión en el suelo, lo que indica un transporte prolongado de materia orgánica no biodegradable, corroborado por su alta concentración inicial 7.782 mg/L y su extensión de pluma en el modelo. Este resultado refuerza la aplicabilidad del modelo SEEP/W-CTAN/W como herramienta de alerta temprana (Zhang & Hu, 2022), ya que permite proyectar con precisión el impacto diferenciado de cada contaminante sobre el suelo y las aguas subterráneas y sugiere aceptar la hipótesis alternativa H_1

13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

13.1. Objetivo Específico 1: Recolección y análisis de información del relleno sanitario

La primera etapa de la investigación consistió en el levantamiento y análisis de información relevante del área de estudio, con el objetivo de caracterizar las condiciones físicas, geológicas, hidrogeológicas y técnicas del sitio donde se encuentra el relleno sanitario objeto de análisis. Esta caracterización es fundamental para construir el modelo conceptual y numérico de infiltración de lixiviados, así como para interpretar los resultados obtenidos en las etapas posteriores de laboratorio y simulación.

13.1.1. Ubicación geográfica y delimitación del área de estudio

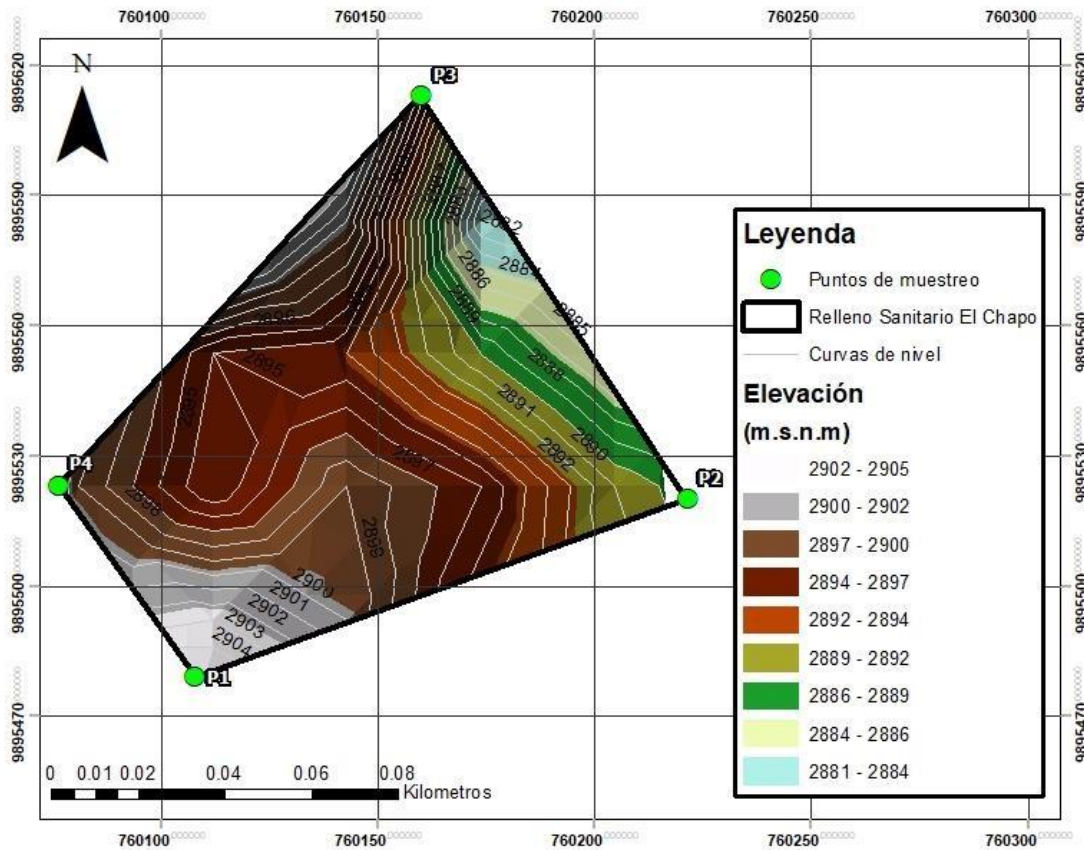
El relleno sanitario se localiza en la parroquia Eloy Alfaro, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, Ecuador. Las coordenadas geográficas aproximadas del sitio son: -0.943438, -78.662396. El área de estudio abarca tanto el cuerpo del relleno como su entorno inmediato, incluyendo el perfil geológico subyacente y el posible flujo hacia el nivel freático. Para el análisis de los perfiles hidráulicos se tiene referencia de cuatro puntos coordenados ubicados en el vértice del relleno sanitario, según la tabla 7, teniendo un recorrido que oscila desde los 2900 hasta los 2884 m.s.n.m.

Tabla 7. Coordenadas de los vértices del relleno sanitario

Punto	Coordenadas
P1	-0.944906, -78.662713
P2	-0.944394, -78.661743
P3	-0.943438, -78.662361
P4	-0.944421, -78.663076

La zona presenta un clima andino templado, con una precipitación media anual de aproximadamente 160 mm y una temperatura media de 10°C según la base de datos del INAMHI, lo cual influye directamente en la generación de lixiviados. En la Figura 1 se describe la información recabada del área de estudio.

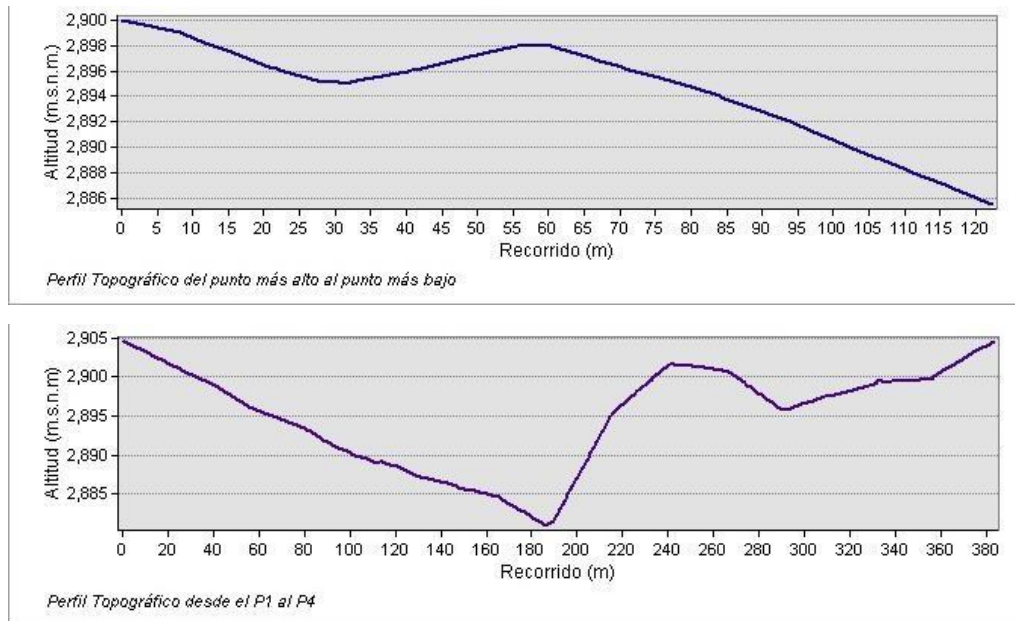
Figura 2. Área de estudio y elevación de la celda emergente



13.1.2. Caracterización topográfica y estratigráfica

Se realizó un reconocimiento de la topografía local, identificando taludes, pendientes, zonas de escurrimiento superficial y áreas susceptibles de acumulación de agua. La estratigrafía del subsuelo se determinó a partir de información secundaria de estudios geotécnicos, perforaciones de control, o datos publicados por la autoridad ambiental o municipal, en la figura 2 se describe los diferentes taludes e inclinaciones.

Figura 4. Perfil topográfico del relleno Sanitario



Nota: Perfiles laterales topográficos de los puntos P1, P2, P3 y P4

13.1.4. Información sobre el diseño y operación del relleno sanitario

Se recopilaron datos técnicos del diseño del relleno, incluyendo:

- Capas de impermeabilización utilizadas, determinado que en la construcción de las celdas emergentes se encuentra impermeabilizado por geomembrana datos proporcionados por EPAGAL.
- Sistema de captación y conducción de lixiviados.
- Volumen total de residuos depositados.
- Altura promedio del cuerpo de residuos.
- Edad del relleno y cronograma de operación.
- Existencia o no de recirculación de lixiviados o biogás.

Esta información permitió establecer la geometría del modelo, las posibles fuentes de generación de lixiviados y los puntos de infiltración hacia el subsuelo.

13.1.5. Caracterización hidrogeológica del sitio

La zona presenta un sistema de acuífero libre, con el nivel freático ubicado a una profundidad variable que según Núñez G. et al (2023) distinguen un sistema acuífero libre a semiconfinado con porosidad primaria, un nivel freático medio de 5,2 m y un nivel piezométrico medio de 19,6 m. En este sistema, el agua subterránea ingresa por recarga lateral de los glaciares Cotopaxi, y recarga local; se desplaza a través de los depósitos volcánicos del Cotopaxi y Chalupas, y se descarga en el río Cutuchi, y su gradiente hidráulico es de aproximadamente 11,1 %. La conductividad hidráulica de los materiales del subsuelo varía entre $4,75 \text{ e}^{-7}$ y $3,02 \text{ e}^{-6}$ m/s, desde los perfiles P3 y P2 en la parte más alta de la celda y P1 y P4 en la parte más baja de la celda, esto se en función de la textura y compactación del suelo, que en este caso según el estudio de factibilidad técnica de EPAGAL está en un rango de 62% de franco limoso por la gran presencia de cascajo y caliza. Se resume en la tabla 7.

Tabla 8. *Resumen de componentes Hidrogeológicos para la simulación*

Parámetro	Valor	Unidades
Gradiente Hidráulico	11,1	%
Conductividad Hidráulica	$3,02\text{e}^{-6}$ a $4,75\text{e}^{-7}$	m/s
Textura del Suelo	60-70 (franco limoso)	%

La información hidrogeológica se obtuvo a partir de informes técnicos existentes de EPAGAL, bases de datos proporcionadas por la SENAGUA, MAATE. Estos datos son críticos para establecer las condiciones de frontera en los modelos SEEP/W y CTRAN/W.

13.1.6. Discusión sobre la relevancia de esta etapa para la simulación

La información recabada en esta etapa permitió definir:

- La **geometría del modelo** de infiltración de lixiviados.
- Las **condiciones de borde** para el flujo de agua y transporte de contaminantes.
- Las **propiedades del medio poroso**.
- La **fuentes contaminante** y su ubicación en el modelo.

Por lo que, la confiabilidad de los resultados obtenidos en las etapas de simulación y validación dependen en gran medida de la calidad y precisión de estos datos iniciales. Por tanto, se aplicó un criterio técnico riguroso para documentar, contrastar y verificar la información recopilada.

13.2. Objetivo específico 2: Propiedades fisicoquímicas del lixiviado y regulación legal.

13.2.1. Discusión medidas de tendencia central

En la tabla, se muestran los valores analizados de las medidas de tendencia central.

Tabla 9. Parámetros de estadística descriptiva sobre los contaminantes del lixiviado.

Parámetro	Media (mg/L)	Mediana (mg/L)	Mínimo	Máximo	Rango	Desv. Estándar	CV (%)
DQO	7.882,6	7.931,0	7.740,5	7.976,3	235,8	125,1	1,6
DBO	3.902,3	3.785,2	3.785,2	4.136,6	351,4	202,9	5,2
Nitrógeno	13,6	13,8	11,7	15,2	3,5	1,75	12,9
Fósforo	25,7	25,1	25,1	27,1	2,0	1,16	4,5
Fenoles	0,25	0,25	0,25	0,26	0,01	0,007	2,9

La estadística descriptiva muestra comportamientos diferenciados en términos de concentración y variabilidad para los contaminantes evaluados, lo cual concuerda con los resultados del ANOVA y las simulaciones en CTRAN/W:

1. DQO: Presenta la concentración media más alta (7.882 mg/L) y un bajo coeficiente de variación (CV = 1,6 %), lo que indica estabilidad en las mediciones y persistencia en el lixiviado. Este comportamiento es característico de la materia orgánica recalcitrante, que puede mantenerse por largos periodos en el subsuelo, incrementando el riesgo de agotamiento de oxígeno y alteración de las condiciones redox del suelo (Liu et al., 2021).
2. DBO: Aunque también elevada (3.902 mg/L), muestra mayor variabilidad (CV = 5,2 %), coherente con su biodegradabilidad y su sujeción a procesos microbianos que disminuyen su concentración durante el transporte (Wang et al., 2022).
3. Nitrógeno: Destaca por el mayor CV (12,9 %), evidenciando alta movilidad y variabilidad, lo que se asocia a procesos de transformación bioquímica como

nitrificación y desnitrificación en condiciones variables de oxígeno. Su media (13,6 mg/L) implica un riesgo potencial para aguas subterráneas, ya que concentraciones superiores a 10 mg/L de N-NO_3^- se consideran peligrosas para consumo humano (WHO, 2022).

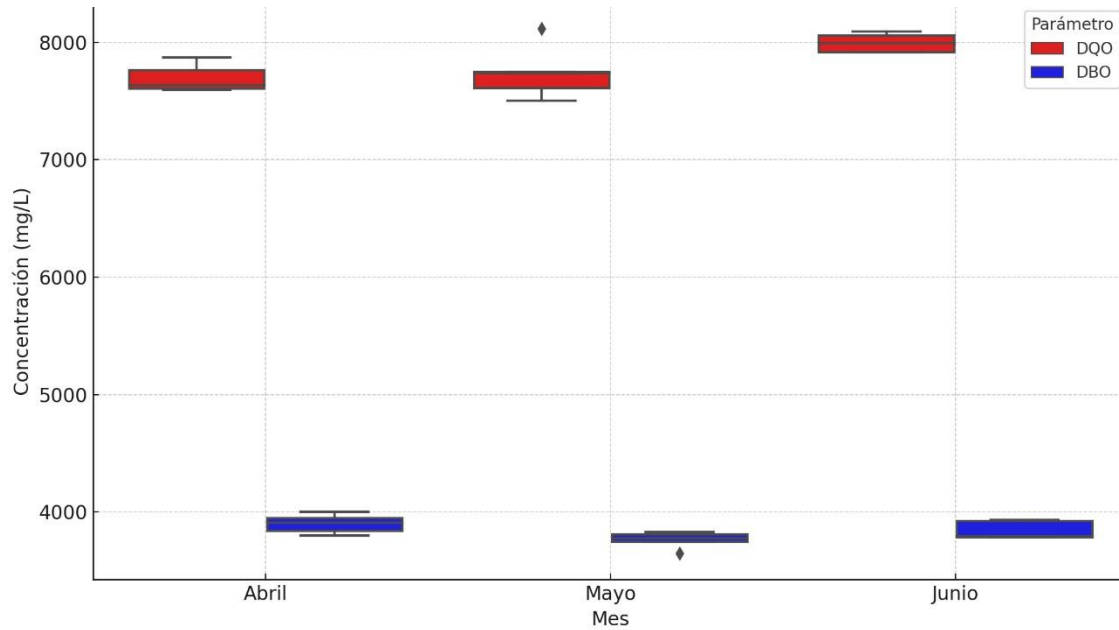
4. Fósforo: Con un CV moderado (4,5 %) y valores estables 25 mg/L, tiende a adsorberse parcialmente en suelos limosos, pero a estas concentraciones puede contribuir a procesos de eutrofización en cuerpos receptores si alcanza aguas superficiales (Zhou et al., 2021).
5. Fenoles: Aunque presentes en concentraciones traza (0,25 mg/L), su baja variabilidad (CV = 2,9 %) y su alta solubilidad hacen que, pese a no representar un riesgo inmediato, se deba monitorear continuamente por su toxicidad y posible acumulación en acuíferos (EPA, 2023; Zhang et al., 2021).

En conjunto, estos resultados confirman la necesidad de estrategias de monitoreo y tratamiento diferenciadas, priorizando la DQO y DBO por su alta carga orgánica y el nitrógeno por su movilidad y riesgo potencial en aguas subterráneas.

13.2.2. Discusión del Diagrama de cajas

Se realizó un monitoreo cada primera semana de los meses de abril hasta junio, según lo descrito en la metodología, en el box plots presentado se puede apreciar que la medida de tendencia centra es muy lejana a los límites regulatorios descritos en la tabla 8, que están en 250 ppm para DBO y 500ppm para DQO, la gran presencia de materia orgánica es típica en vertidos de esta naturaleza por lo que se adaptan sistemas de tratamiento de lixiviados para cumplir con los estándares nacionales, adicional según la literatura se mantiene un margen de 2:1 de DBO con respecto a DQO estimando valores de 3800 a 7700 ppm en el periodo de monitoreo, establecido en la figura 5.

Figura 5. Comparación DQO y DBO monitoreados.



13.2.3. Discusión y análisis de la caracterización del lixiviado en relación a los límites máximos permisibles.

Según la investigación realizada en Romerillos, Cantón Mejía por Totoy C. (2022), uno de los factores que impactan más al suelo con altas concentraciones de DQO es el crecimiento desmedido que favorece la proliferación de bacterias reductoras (ej. sulfato-reductoras, metanogénicas) y puede alterar profundamente el equilibrio biogeoquímico, esto se corrobora permitiendo la acumulación de nitrógeno total en el suelo del Inchapo, con una concentración media de 3160 ppm sobre los 60 ppm permitidos por la norma actual, en el tema ambiental el exceso de materia orgánica puede generar un desbalance ecológico microbiano, que favorece organismos anaerobios oportunistas, disminuye la diversidad microbiana aerobia, y a largo plazo, esto afecta la capacidad de regeneración del suelo y su fertilidad. Hablando del transporte de contaminantes, más específico en el proceso de reacción, lo que exponen Gutiérrez et al., (2024) para un diseño de humedales en serie orientado a la remoción de materia orgánica, fósforo y nitrógeno, un gran problema encontrado en suelos contaminados por compuestos orgánicos originados de lixiviado es la disolución de elementos minerales del suelo, de ello se tiene que se acelera la lixiviación de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, por lo que se explica claramente la presencia de fósforo en rangos fuera de norma que bordeó los 26 ppm sobre los 15 ppm establecidos, sumándose a una reducción de la capacidad de retención de

nutrientes y puede derivar en eutrofización si alcanzan cuerpos de agua o agua subterránea, en la tabla se muestran los valores de interés sobre los parámetros discutidos en esta sección.

Tabla 10. *Resumen parámetros fisicoquímicos del lixiviado frente a la regulación Ambiental Ecuatoriana*

Parámetro	Unidad	Resultado	Límite Máximo Permisible	Criterio de Resultado
Potencial de hidrógeno	u pH	8.64	6-9	Cumple
Temperatura	°C	18.2 3831,97	<40	Cumple
DBO	mg/l		250	No cumple
DQO	mg/l	7781,5	500	No cumple
Fenoles	mg/l	0,26	0,2	No cumple
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/l	3174,2	60	No cumple
Sólidos Totales	mg/l	16904	1600	No cumple
Fósforo	mg/l	26,01	15	No cumple

En cuanto al pH a pesar de estar dentro de rangos normales regulatorios, se puede decir basado en lo estudiado por Becerra-Moreno et al., (2021), un pH ligeramente básico en lixiviados, por ejemplo, valores entre 7.5 y 8.5, es común en rellenos sanitarios en etapa de estabilización o con predominancia de residuos orgánicos parcialmente degradados, claro ejemplo para el relleno sanitario de Latacunga que mantiene un pH de 8,64 que ya ha superado la etapa fermentativa de la materia orgánica.

Por otro lado, los fenoles están en un rango de 0,26 ppm sobre 0,2 ppm superando en un 5% las regulaciones vigentes, cabe resaltar que un análisis realizado por Carbonell, (2024) sugiere que los fenoles generados por la descomposición de residuos orgánicos e industriales en un relleno sanitario representan un riesgo ambiental importante. En el relleno sanitario existe la posibilidad que, en el suelo, estos compuestos alteren la actividad microbiana, la disponibilidad de nutrientes y la calidad edáfica general, datos que se favorecen a la baja fijación de nitrógeno disponible para plantas. En cuanto a las aguas subterráneas, su alta solubilidad favorece la movilidad a través de perfiles porosos, lo que incrementa la posibilidad de contaminación de acuíferos. Su toxicidad aguda y crónica para organismos acuáticos y humanos justifica la necesidad de su monitoreo dentro de los parámetros prioritarios en estudios de impacto ambiental.

13.2.4. Discusión sobre el análisis ANOVA

El análisis estadístico ANOVA de una vía evidenció diferencias significativas entre las concentraciones de los principales parámetros evaluados en el lixiviado del relleno sanitario ($F = 3259,8$; $p < 0,05$). Este resultado confirma que los contaminantes presentan rangos de concentración claramente diferenciados, reflejando la naturaleza y comportamiento específico de cada uno. La DQO y la DBO mostraron valores en el orden de miles de mg/L, lo que ratifica la elevada carga orgánica característica de lixiviados en fase metanogénica. Por su parte, el nitrógeno total y el fósforo se ubicaron en un rango intermedio 10 a 30 mg/L, lo que representa un riesgo potencial de eutrofización en caso de infiltración hacia cuerpos hídricos. Finalmente, los fenoles, aunque presentes en concentraciones traza 0,26 mg/L, son ambientalmente relevantes por su toxicidad y movilidad en suelos franco-limosos. Este comportamiento diferenciado de los contaminantes respalda la necesidad de aplicar estrategias de tratamiento y control específicas para cada tipo de parámetro, priorizando la reducción de la carga orgánica y la contención de nutrientes y micro contaminantes tóxicos antes de su migración al suelo o al agua subterránea, en la siguiente tabla se describe los datos analizados mediante ANOVA.

Tabla 11. *Resultados ANOVA*

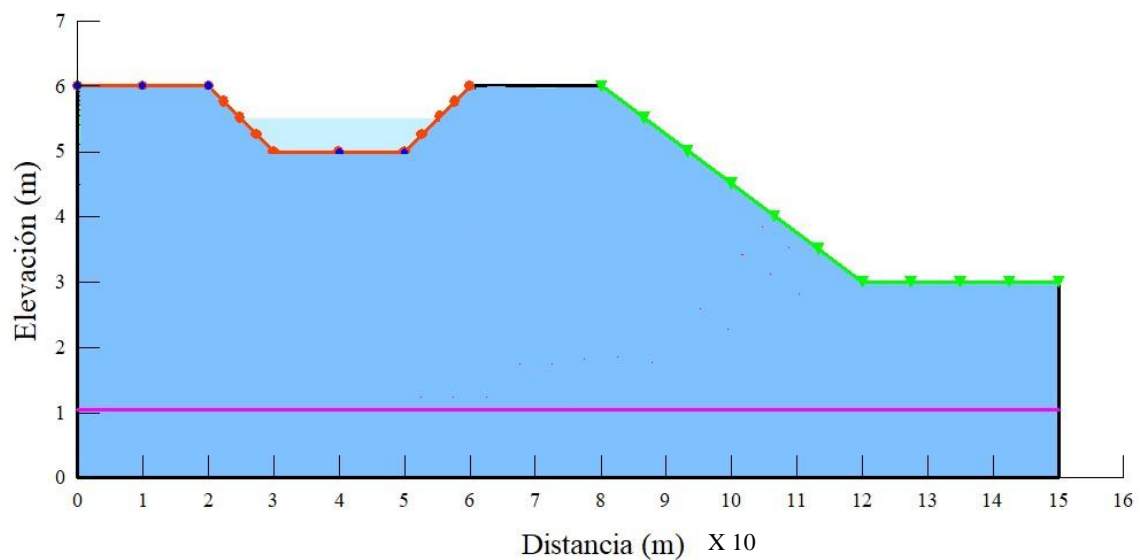
Parámetro	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Media aprox.
DQO	7931.01	7740.52	7976.30	~7882.6
DBO	4136.60	3785.16	3785.17	~3902.3
Nitrógeno	15.18	13.80	11.70	~13.6
Fósforo	27.08	25.07	25.06	~25.7
Fenoles	0.261	0.248	0.249	~0.25

13.3. Objetivo específico 3: Modelación numérica del transporte de contaminantes resultados y análisis.

13.3.1. Condiciones de frontera

El modelo en SEEP/W fue configurado con condiciones de frontera ajustadas a un perfil de relleno sanitario con geomembrana defectuosa. Se definió una zona de entrada de flujo a través de una sección degradada (línea roja), y un límite abierto a la atmósfera en el talud superior (línea verde). La base se consideró impermeable, y el nivel freático se ubicó a 1 m. La simulación incorpora parámetros hidráulicos típicos de un suelo franco limoso y un gradiente hidráulico del 11,1%, representativo de la inclinación topográfica del terreno. Esta configuración permite estimar la infiltración realista de lixiviados en presencia de fallas estructurales en el sistema de impermeabilización, la figura muestra la configuración del simulador.

Figura 6. Malla de simulación SEEP/W

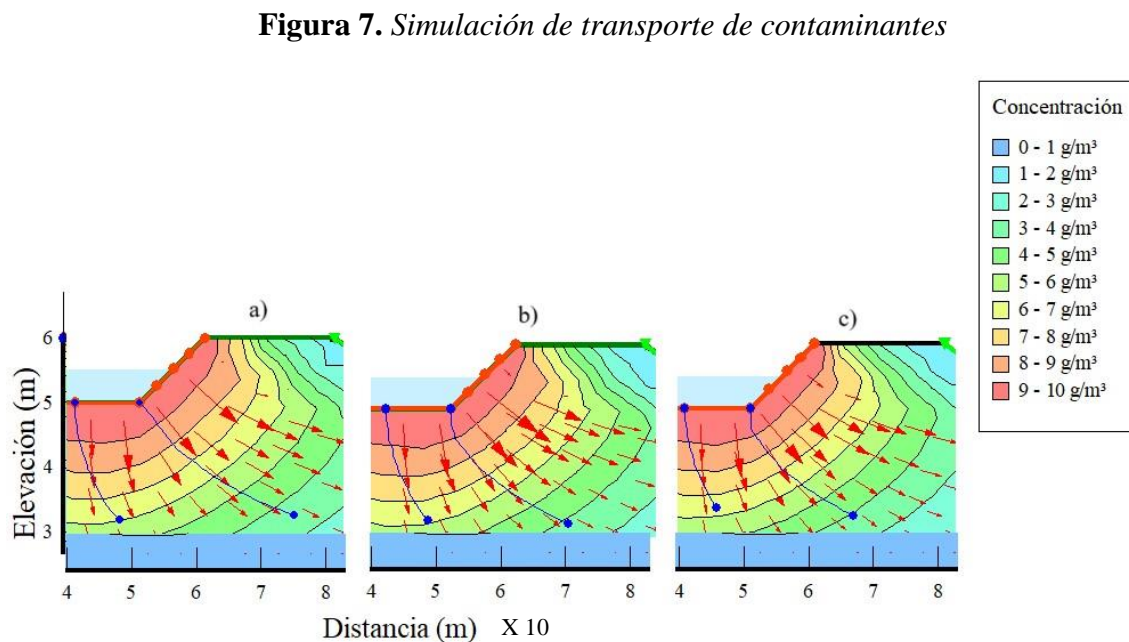


En la simulación para transporte de contaminantes realizada por Cueto Velázquez, M. (2023), especifica que la definición de condiciones de frontera es un paso crítico en la simulación

numérica de infiltración de lixiviados, ya que determina la interacción del sistema modelado con su entorno físico. Para el estudio en el Inchapo, dichas condiciones controlan la entrada y salida de flujo, así como la distribución de presiones, lo que permite replicar de forma realista el comportamiento del relleno sanitario. En resumen, una definición incorrecta puede generar resultados inconsistentes, subestimar el riesgo de contaminación o inducir errores en la predicción de trayectorias de contaminantes.

13.3.2. Simulación de concentraciones de materia orgánica en el suelo para 90 días

Se partió con las condiciones estudiadas en la etapa 2 de los aspectos físico químicos del lixiviado, centrándose en DQO, DBO y Nitrógeno que muestran cantidades abrumadoras de concentración que tiene un potencial muy alto de generar un pasivo ambiental en caso de una falla en el sistema de impermeabilización de las celdas emergentes. La figura 6 muestra los resultados simulados.



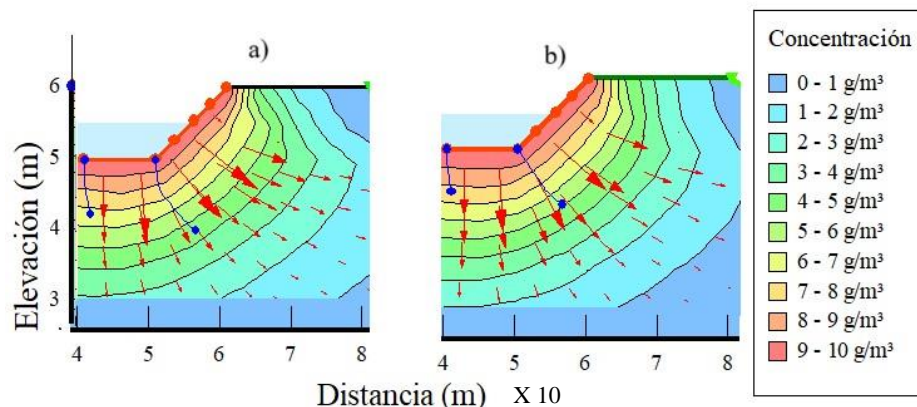
Nota: a) Simulación para el DQO, b) DBO, c) Nitrógeno

La simulación numérica realizada con CTRAN/W para un periodo de 90 días muestra diferencias importantes en el comportamiento del transporte de contaminantes. El DQO alcanza

con procesos de advección y dispersión atenuación natural un valor de $3-4 \text{ g/m}^3$, claramente se observa una reducción, pero presentó la mayor extensión y persistencia, indicando una alta presión sobre la calidad del suelo. El DBO, aunque de menor alcance, evidenció posibilidades de atenuación natural con un valor de $1-2 \text{ g/m}^3$. El nitrógeno mostró alta movilidad lateral y vertical, lo que podría implicar un riesgo elevado para aguas subterráneas si no se implementan medidas de control adecuadas. Estas diferencias resaltan la necesidad de un enfoque específico para el monitoreo y tratamiento de cada tipo de contaminante en rellenos sanitarios, de la simulación es importante recalcar que la movilidad simulada en dos puntos clave de la base de la celda emergente fue entre valores de 10m a 40m en los 90 días, comparando con otros estudios realizados en la EPN por Jaramillo Merino, S.B. (2024), un caso similar se da en los cementerios del cantón Quito como son Nanegal, Puenbo y Nono que alcanzaron 200m de movilidad desde su origen a cuerpos hídricos con altas concentraciones de DBO, DQO, Nitrógenos y fosfatos, haciendo un caso homologado al del relleno sanitario, los lixiviados según su movilidad simulada en noventa días, tiene el potencial de llegar a niveles de acuíferos en más tiempo de transporte, reduciéndose en un 50% estimado la concentración de DBO y DQO, sumado efectos de atenuación natural, dilución por acuífero y dispersión.

Por otro lado, se analizó los fenoles en su avance desde el mes de abril hasta julio, iniciado con los datos establecidos en la etapa 2 los resultados de simulación se muestran en la figura 7.

Figura 8. Comportamiento de fenoles



La simulación del transporte de fenoles durante un periodo de 90 días evidenció una movilidad significativa de este contaminante desde una fuente puntual en el perfil superior del relleno sanitario. En abril, la pluma se concentra cerca del punto de infiltración, mientras que en junio se observa un avance claro hacia zonas más profundas. Este comportamiento es consistente con la alta solubilidad de los fenoles y su baja retención en suelos francos limosos. Aunque su concentración inicial es baja (0.026 g/m^3), estudios realizados en el tratamiento de lixiviados

mediante celdas microbianas de combustible realizado por Rivas J. (2022) evidencia un potencial de acumulación y migración que, en ausencia de medidas de contención o remediación, podría representar un riesgo para las aguas subterráneas a mediano plazo debido a la característica biocida recalcitrante y efecto toxicológico que se acumularía en sedimentos y posible paso a la cadena trófica por uso de aguas subterráneas, en la simulación a los 90 días el fenol avanzó un 1m en vertical y 30 cm en horizontal al atenuarse y dispersarse por mecanismos naturales, debido a una baja concentración del mismo en el lixiviado analizado, en si los fenoles por factores de dilución y dispersión no representan un riesgo significativo en los suelos y aguas subterráneas cerca del relleno sanitario.

13.3.3. Validación de datos por error cuadrático medio

El RMSE calculado en base a la metodología aplicada en este estudio permite validar los datos de laboratorio y los simulados, y es así que los cálculos se pueden observar en el los Anexos, de estos cálculos se desprenden valiosas interpretaciones sobre el modelo aplicado que es la Ecuación de Advección, Difusión y Reacción, continuación en la tabla se muestra las interpretaciones.

Tabla 12. *Análisis y discusión del error cuadrático medio*

Parámetro	RMSE (mg/L)	Interpretación
DQO	300	Error aceptable para concentraciones altas (~7800 mg/L), representa ~3.8 % de diferencia relativa. Lo que Indica buena calibración del modelo.
DBO	200	Representa ~5.1 % de error respecto al valor observado, lo cual es razonable en sistemas biodegradables y sujetos a variabilidad.
Nitrógeno	1.7	Aunque el valor absoluto parece bajo, equivale al 13.6 % de diferencia relativa, lo que indica que el modelo podría subestimar la movilidad o concentración.
Fenoles	0.006	Dado que el valor observado es muy bajo (0.026 mg/L), este RMSE implica un 23 % de error relativo. Aunque numéricamente pequeño, es crítico por la toxicidad del compuesto.

Hay que tomar en cuenta que a niveles traza como es el fenol y considerando la movilidad del nitrógeno se genera errores relativos altos, consecuencia de la naturaleza fisicoquímica de estos compuestos y su movilidad en medios de texturas limosas carentes de procesos de adsorción de contaminantes, lo que resalta en el estudio de Inchapo mostrando que las diferencias entre

valores simulados y medidos se deben en gran parte a la idealización del medio poroso, la omisión de procesos biogeoquímicos complejos y la simplificación de las propiedades del contaminante en la simulación numérica. Guerrero, C., & Meryluz, E. (2022). concluyeron en un estudio de calidad de agua, que es un caso homólogo al estudiado en cuanto a concentración de contaminantes, que los parámetros mayoritarios DQO y DBO, que presentaron errores aceptables, los compuestos traza (nitrógeno y fenoles) exigieron mayor precisión en la definición de coeficientes de dispersión, adsorción y reacción para mejorar la fiabilidad del modelo, avalando lo estudiado en el presente estudio. En resumen, la fiabilidad del modelo se reduce a niveles de contaminantes traza, pero en el contexto del relleno sanitario, su baja concentración y sumado a los factores de atenuación natural minimizan significativamente el impacto del fenol como contaminante emergente en el lixiviado.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1. Conclusiones

- La caracterización del sitio del relleno sanitario de Latacunga permitió definir un modelo conceptual sólido del subsuelo y sus condiciones. Se determinó que el relleno se asentaba sobre estratos de suelo franco limoso de baja permeabilidad, con una topografía moderadamente inclinada, pendiente hidráulica 11 %, y un nivel freático relativamente somero, alrededor de 5 m de profundidad. Estas condiciones implicaban que, bajo circunstancias normales, la infiltración vertical de lixiviados sería lenta; sin embargo, la pendiente favorecía un flujo lateral acelerado en caso de que ocurrieran filtraciones.
- El análisis de laboratorio de los lixiviados evidenció concentraciones extremadamente elevadas de contaminantes orgánicos y nutrientes, ampliamente superiores a los límites legales para vertidos. En promedio, la DBO₅ de un valor de 3,832 mg/L y la DQO de 7,782 mg/L superaron en más de 15 veces los límites permisibles (250 mg/L y 500 mg/L, respectivamente). Esto indicó una carga orgánica muy alta, típica de lixiviados en fase metanogénica estable, capaz de agotar el oxígeno del medio receptor y alterar significativamente las condiciones redox del suelo.

Asimismo, se detectó Nitrógeno Total Kjeldahl (3,174 mg/L, principalmente en forma amoniacal y orgánica) y Fósforo (26 mg/L) en concentraciones decenas de veces superiores a las normativas, lo cual confirmó un potencial de eutrofización y lixiviación de nutrientes. La presencia de fenoles de 0,26 mg/L, ligeramente por encima del límite (0,2 mg/L) se consideró para analizar debido a toxicidad y alta solubilidad.

- El modelamiento, concluyó que cada contaminante del lixiviado se comportaba de manera diferenciada en el subsuelo: los compuestos orgánicos recalcitrantes (DQO) podían dispersarse ampliamente y persistir, los biodegradables (DBO) tendían a decaer más rápidamente con alcance menor, los nutrientes inorgánicos (N_2) se desplazaban extensamente pudiendo comprometer aguas subterráneas, y los tóxicos específicos (fenoles) aun en baja concentración lograban movilizarse apreciablemente. Esto evidenció que una falla en el sistema de impermeabilización podía traducirse, incluso en el corto plazo, en una contaminación subsuperficial significativa, afectando decenas de metros de suelo y acercándose al nivel freático. Además, la comparación con estudios análogos sugirió que, de persistir la filtración más allá de 90 días, las plumas contaminantes podrían extenderse centenas de metros con el tiempo, incrementando el radio de impacto ambiental. Para evaluar la confiabilidad del modelo numérico empleado, se calculó el Error Cuadrático Medio (RMSE) comparando las concentraciones simuladas con valores de referencia. Los resultados de validación indicaron que el modelo logró una alta precisión para los principales contaminantes orgánicos: el RMSE fue de 300 mg/L para DQO y 200 mg/L para DBO, lo que equivalía a un 3,8 % y 5,1 % de error relativo, respectivamente. Estos porcentajes de error, inferiores al 5 %, se consideraron aceptables dada la alta variabilidad inherente a los sistemas reales de lixiviados, por lo que se confirmó una buena calibración del modelo para predecir la dispersión de la carga orgánica. En contraste, en el caso de los contaminantes presentes en menores concentraciones, pero de alta movilidad, el modelo mostró desviaciones relativas mayores: para el nitrógeno el RMSE (1,7 mg/L) representó un error del 13,6 %, y para los fenoles un RMSE aparentemente minúsculo (0,006 mg/L) implicó alrededor del 23 % de error relativo.

14.2. Recomendaciones

- Se recomienda al GAD de Latacunga reforzar el monitoreo y mantenimiento de las barreras de impermeabilización y del sistema de captación de lixiviados. En particular, inspecciones periódicas de la geomembrana y controles de nivel freático deben implementarse para detectar precozmente cualquier anomalía. Además, se sugiere considerar medidas de ingeniería adicionales por ejemplo una geomembrana secundaria o sistemas de alarma de fugas en las zonas críticas identificadas, con el fin de mitigar el riesgo de infiltración de lixiviados hacia el suelo y las aguas subterráneas.

- Se recomienda implementar medidas rigurosas de gestión y tratamiento de lixiviados a EPAGAL en su plan de manejo ambiental. Es fundamental que el lixiviado sea captado y tratado mediante procesos físico-químicos y biológicos, antes de cualquier disposición final, con especial énfasis en la reducción de DBO/DQO y la remoción de nitrógeno, fósforo y fenoles. Adicionalmente, los parámetros críticos (DBO, DQO, N, P, fenoles, metales pesados) deben ser monitoreados regularmente en el lixiviado y en aguas subterráneas cercanas, de modo que se puedan detectar a tiempo aumentos anómalos en la concentración. Finalmente, dado el carácter recalcitrante de algunos compuestos, se sugiere evaluar tecnologías complementarias de tratamiento avanzado para garantizar que el efluente tratado cumpla con los estándares ambientales y no represente un pasivo ambiental a largo plazo.
- Se recomienda incorporar medidas proactivas de control y remediación informadas por la simulación para el relleno sanitario del GAD Latacunga. Primero, los resultados subrayan la necesidad de diseñar sistemas de contención redundantes en rellenos sanitarios; por ejemplo, considerar la instalación de dobles liners o barreras reactivas que atenúen contaminantes específicos en zonas críticas. Segundo, se sugiere establecer pozos de monitoreo aguas abajo del relleno a distancias estratégicas 10 m, 20 m, 50 m. en la dirección del flujo subterráneo, con el fin de detectar a tiempo la presencia de DQO, nitrógeno, fenoles u otros contaminantes, tal como lo indica la extensión simulada de las plumas.

15. BIBLIOGRAFÍA

- Achkar, F. (2005). *Ordenamiento Ambiental del Territorio. (UdelaR, Ed.) DIRAC, Facultad.* Obtenido de <https://www.studocu.com/latam/document/liceo-departamental-demaldonado/geografia/fcien-achkar-m-2005-ordenamiento-ambiental-delterritorio/89798787>
- Abbaspour, H., Shorafa, M., Daneshfaraz, R., Mohammadi, M. H., & Rashtbari, M. (2012). Study and comparison the efficiency of Mualem-Van Genuchten and Brooks-Corey models in predicting unsaturated hydraulic conductivity in compacted soils.
- Acuerdo Ministerial 097A, Anexo 1, Libro VI, Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes al recurso agua, Tabla 8 Límites de descarga al sistema de alcantarillado público, , Registro Oficial 387, Noviembre 2015. https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_RegistroOficial-No-387-04-noviembre-2015_0.pdf
- Alvarado Figueroa, N. G. (2023). Identificación de barreras a la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible en el Área Metropolitana de San Salvador [Tesis de licenciatura]. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/69286>
- Ambuludi-Paredes, R. R., Carvajal-Padilla, V. P., & Diéguez Santana, K. (2021). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos

- sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Revista Tecnología en Marcha*.
<https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5413>
- Barakat, F. B., & Rowe, R. K. (2025). Implications of single and double liners on the impact of PFOA in landfills on an underlying aquifer. *Geotextiles and Geomembranes*, 53(1), 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.09.009>
- Binning, P. J., & Celia, M. A. (2022). Coupled air-water flow and contaminant transport in the unsaturated zone: A numerical model, 2, 45.
<https://collaborate.princeton.edu/en/publications/coupled-air-water-flow-andcontaminant-transport-in-the-unsaturat>
- Biondi, G., Cazzuffi, D., Moraci, N., & Soccodato, C. (Eds.). (2023). *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet*. Proceedings of the 12th International Conference on Geosynthetics (12ICG), September 17-21, 2023, Roma, Italy. Taylor & Francis.
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewiamo2utiOAxWISTABHYrXGxEQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.taylorfrancis.com%2Fbooks%2Foa-edit%2F10.1201%2F9781003386889%2Fgeosyntheticsleading-way-resilient-planet-giovanni-biondi-daniele-cazzuffi-nicola-moraci-claudiosoccodato&usg=AOvVaw3TnsUAKjNr3qbsHdAGCwvU&opi=89978449>
- Blasioli, S., Braschi, I., & Gessa, C. E. (2010). How agricultural chemistry can contribute to dealing with problems of environmental pollution. Contribution de la chimie agricole à la problématique de la pollution de l'environnement. Il contributo della chimica agraria alle problematiche dell'inquinamento ambientale.
<https://eqa.unibo.it/article/download/3797/3223>
- Boateng, S., & Cawfield, J. D. (2022). Two-dimensional sensitivity analysis of contaminant transport in the unsaturated zone. *Ground Water*, 37(2), 185–193.
<https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1999.TB00973.X>
- Campillo-Cora, C., Conde-Cid, M., Arias-Estévez, M., Fernández-Calviño, D., & Alonso-Vega, F. (2020). Specific adsorption of heavy metals in soils: Individual and competitive experiments. *Agronomy*, 10(8), 1113. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10081113>
- Carbonel, D. (2024). Caracterización de lixiviados y análisis del índice de potencial de contaminación en dos rellenos sanitarios peruanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40. <https://doi.org/10.20937/rica.55105>
- Cañarte Sarango, R. B., & Castillo Ortega, Y. (2023). Factores correlacionales de un sistema de relleno sanitario sostenible y sustentable en Arenillas – Ecuador. *MQRInvestigar*, 7(1), 3033–3047. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.3033-3047>
- Chanson, H. (2004). Advective diffusion. En *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows* (pp. 75–80). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-075066165-2.50038-2>
- Chavarría Acuña, O. A. (2022). Comparación de los impactos ambientales ocasionados por la técnica de incineración y rellenos sanitarios para la gestión de residuos sólidos. *Ingeniería*, 32(2), 1–12. <https://doi.org/10.15517/ri.v32i2.48546>

- Černohlávková, J. (2009). *Effects of selected environmental pollutants on soil microbial community in laboratory and field studies*. <https://theses.cz/id/psbqdo/>
- Chetti, A. (2024). Simulating groundwater flow and contaminant transport. *Studies in Engineering and Exact Sciences*, 5(2), e11625. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-644>
- Chung, E. T., Efendiev, Y., Leung, W. T., & Ren, J. (2015). Multiscale simulations for coupled flow and transport using the generalized multiscale finite element method, 3(4), 670–686. <https://doi.org/10.3390/COMPUTATION3040670>
- Cueto Velázquez, M. (2023). Modelado 3d del transporte de contaminantes en una zona urbana. *Repositorio Universidad Rey Juan Carlos*. <https://burjcdigital.urjc.es/items/f528263ef7e6-44e1-b793-de61abcf6f3c>
- Durães, N., Novo, L. A. B., Candeias, C., & Silva, E. F. da. (2018). Distribution, transport and fate of pollutants (pp. 29–57). *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12849873-6.00002-9>
- Esmaili Nasrabadi, A., Ramavandi, B., Bonyadi, Z., Farjadfard, S., & Fattahi, M. (2024). Landfill leachates as a significant source for emerging pollutants of phthalic acid esters: Identification, occurrence, characteristics, fate, and transport. *Chemosphere*, 356, 141873. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141873>
- G Núñez, Procel, S., Viteri, D., & Castro, D. (2023). Modelo conceptual del sistema acuífero volcánico del cantón Latacunga, Cotopaxi-Ecuador. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33575.32161>
- Gatica, G. N., & Inzunza, C. (2020). An augmented fully-mixed finite element method for a coupled flow-transport problem. *Calcolo*, 57(1), 1–41. <https://doi.org/10.1007/S10092020-0355-Y>
- Geiger, S., Roberts, S., Matthäi, S., & Zoppou, C. (2003). Combining finite volume and finite element methods to simulate fluid flow in geologic media. *Anziam Journal*, 44, 180–201. <https://doi.org/10.21914/ANZIAMI.V44I0.678>
- Gomez Quispe, L. N. (2023). Contaminación del agua subterránea por lixiviados de residuos sólidos en el botadero municipal del distrito de Muñani, Puno – 2023. Universidad Privada San Carlos. <http://repositorio.upsc.edu.pe:8080/handle/UPSC/639>
- Gomes, N. Â., Almeida, M. V. de A., Melo, M. C. de, Monteiro, V. E. D., & Oliveira, R. de. (2018). Influence of physical-chemical parameters on the composition of toxic constituents in landfill leachate. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7244222>
- Gutiérrez, G., Panigatti, C., & Schierano, C. (2024). Aplicación de humedal construido híbrido para tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela. *AJEA*, 37. <https://doi.org/10.33414/ajea.1699.2024>
- Hamer, C. E., Halbert, B. E., Webster, M., & Scharer, J. M. (2012). Assessment of model adequacy and parameter identifiability for predicting contaminant transport in the Beaverlodge Lake Area, Canada, 164, 159–170. <https://doi.org/10.2495/WP120141>

- Hohenbrink, T. L., Jackisch, C., Durner, W., Germer, K., Iden, S. C., Kreiselmeier, J., Leuther, F., Metzger, J. C., Naseri, M., & Peters, A. (2023). Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range. *Earth System Science Data*, 15(10), 4417–4432. <https://doi.org/10.5194/essd-15-4417-2023>
- Irto, A., Crea, F., Alessandrello, C., De Stefano, C., Somma, R., Zaffino, G., Zaccaro, S., Papanikolaou, G., & Cigala, R. M. (2024). Landfill leachate from municipal solid waste: Multi-technique approach for its fine characterization and determination of the thermodynamic and sequestering properties towards some toxic metals. *Science of The Total Environment*, 170311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170311>
- Jaramillo Merino, S. B. (2024). Evaluación de la contaminación en agua y suelo causada por cementerios en los cantones Quito, Mejía y Rumiñahui: evaluación de la contaminación ambiental en agua ocasionada por cementerios en la provincia Pichincha-Ecuador (91 páginas). Quito: EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25634>
- Leandri, M., & Augeraud-Véron, E. (2013). Optimal pollution control with distributed delays. *Research Papers in Economics*. <https://ideas.repec.org/p/hal/journal/hal-00798294.html>
- Liang, R., & Isa, Z. M. (2024). Heavy metal transport with adsorption for instantaneous and exponential attenuation of concentration. *Dental Science Reports*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50754-5>
- Liu, B., Finkel, M., Qin, Q., Shi, W., & Grathwohl, P. (2024). Mechanistic modeling of pollutant mass redistribution (sorption/desorption) in heterogeneous systems explaining unexpected slow kinetics. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03176>
- Mohamed, A.-M. O., & Paleologos, E. K. (2018). Soil and contaminant interaction (pp. 205–237). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804830-6.00007-7>
- Mohammadi, A., Malakootian, M., Dobaradaran, S., Hashemi, M., Jaafarzadeh, N., & Parnian, N. (2022). Determination and seasonal analysis of physicochemical characterization and metal(oid)s of landfill leachate in Bushehr port along the Persian Gulf. *Toxin Reviews*, 42, 161–175. <https://doi.org/10.1080/15569543.2022.2027454>
- Morales Crozo, J. P. (2022). Análisis hidrológico del lixiviado generado en el relleno sanitario del Cantón Gonzalo Pizarro, Ecuador, 15. https://www.researchgate.net/profile/Juan-Corozo/publication/358474904_1421-Texto_del_articulo-5116-1-10-20220201/links/620406b34a5456050db11eab/1421-Texto-del-articulo-5116-1-1020220201.pdf
- Naizabayeva, L., Sembina, G., Suleimenova, M., & Manapova, A. (2024). Modelling the distribution of atmospheric pollutants in the urban environment. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.2551.v1>
- Nyika, J. M., Onyari, E. K., Dinka, M. O., & Mishra, S. B. (2019). Heavy metal pollution and mobility in soils within a landfill vicinity: A South African case study. *Oriental Journal Of Chemistry*, 35(4), 1286–1296. <https://doi.org/10.13005/ojc/350406>

- Nyika, J., & Onyari, E. (2019). Hydrogeochemical analysis and spatial distribution of groundwater quality in Roundhill landfill vicinity of South Africa. *Air, Soil and Water Research*, 12, 1178622119872771. <https://doi.org/10.1177/1178622119872771>
- Nyika, J., Onyari, E., Dinka, M. O., & Mishra, S. B. (2019). A comparison of reproducibility of inductively coupled spectrometric techniques in soil metal analyses. *Air, Soil and Water Research*, 12, 1178622119869002. <https://doi.org/10.1177/1178622119869002>
- Racha Jammoul, & Muhsin Rahhal. (2022). Understanding soil contamination by leachate from landfills. *ISSMGE*. <https://doi.org/10.53243/ICEG2023-332>
- Rashid, S. W., Salh Shwan, D. M., & Rashid, K. A. (2022). Physicochemical characterization and evaluation of seasonal variations of landfill leachate and groundwater quality around Tanjaro open dump area of Sulaymaniyah City, Kurdistan, Iraq. *Journal of Chemistry*, 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2022/8574935>
- Sadrnejad, S. A., & Memarianfard, M. (2017). Contamination transport into saturated land upon advection-diffusion-sorption including decay. *Journal of Numerical Methods in Civil Engineering*, 1(3), 67–75. <https://doi.org/10.29252/NMCE.1.3.67>
- Sandström, S., Lannergård, E., Futter, M. N., & Djodjic, F. (2023). Water quality in a large complex catchment: Significant effects of land use and soil type but limited ability to detect trends. *Journal of Environmental Management*, 349, 119500. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119500>
- Soil water retention and hydraulic conductivity measured in a wide saturation range. (2023). <https://doi.org/10.5194/essd-2023-74>
- Stoppiello, M. G. (2021). Transport modelling and contaminant fate in unsaturated soils: Analysis and perspectives [Tesis doctoral, Università degli studi di Salerno]. <https://doi.org/10.14273/unisa-4378>
- Thomas, S. G., & Wheeler, M. F. (2011). Enhanced velocity mixed finite element methods for modeling coupled flow and transport on non-matching multiblock grids. *Computational Geosciences*, 15(4), 605–625. <https://doi.org/10.1007/S10596-011-9227-5>
- Totoy Quinga, C. A. (2022). Evaluación de la eficiencia de remoción de DQO de un humedal artificial para el tratamiento secundario de los lixiviados del relleno sanitario Romerillos, cantón Mejía. (189 páginas). Quito: EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23563>
- Viccione, G., Stoppiello, M. G., Lauria, S., & Cascini, L. (2020). Numerical Modeling on Fate and Transport of Pollutants in the Vadose Zone. 2(1), 34. <https://doi.org/10.3390/ENVIRONSCIPROC2020002034>
- Villa, L. C. G. (2023). Procesos de oxidación aplicados a tratamientos de lixiviados generados en rellenos sanitarios. <https://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/3225>
- Wuana, R. A., Okieimen, F. E., & Vesuwe, R. N. (2014). Mixed contaminant interactions in soil: Implications for bioavailability, risk assessment and remediation. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 8(12), 691–706. <https://doi.org/10.5897/AJEST2013.1624>

- Yeh, T.-C. J., Dong, Y., & Ye, S. (2023). An introduction to solute transport in heterogeneous geologic media (1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009049511>
- Yu, C., Liu, J., Ma, J., & Yu, X. (2018). Study on transport and transformation of contaminant through layered soil with large deformation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(13), 12764–12779. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-1325-7>
- Zhang, J., Zhang, J., Xing, B., Liu, G., & Liang, Y. (2021). Study on the effect of municipal solid landfills on groundwater by combining the models of variable leakage rate, leachate concentration, and contaminant solute transport. *Journal of Environmental Management*, 292, 112815. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112815>
- Zhang, P., & Hu, L. (2022). *Contaminant Transport in Soils Considering Preferential Flowpaths*. 50–59. <https://doi.org/10.1061/9780784413432.006>
- Zurita, C. P. C., & Acosta, N. P. L. (2021). Modelación del transporte de contaminantes en la masa de suelo. <https://www.smig.org.mx/archivos/comite/4.pdf>