



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE IMPERMEABILIZACIÓN  
EN RELLENOS SANITARIOS: CASO PICHACAY –  
CUENCA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**AUTOR: ANA BELÉN ASTUDILLO MEJÍA  
JOHANNA GABRIELA LANDI VILLA  
DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN  
RELLENOS SANITARIOS: CASO PICHACAY – CUENCA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**AUTOR: ANA BELÉN ASTUDILLO MEJÍA**

**JOHANNA GABRIELA LANDI VILLA**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ LUIS SOLANO PELÁEZ**

**CUENCA-ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

**Ana Belén Astudillo Mejía y Johanna Gabriela Landi Villa** portadores de las cédulas de ciudadanía N° **0106055064** y **0150713220**. Declaro ser el autor de la obra: **“Evaluación de métodos de impermeabilización en rellenos sanitarios: Caso Pichacay – Cuenca”**, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 16 de octubre de 2025



f.....

**Ana Belén Astudillo Mejía**

**C.I. 0106055064**



f.....

**Johanna Gabriela Landi villa**

**C.I. 0150713220**

### **CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS**

Yo **Ing. José Luis Solano Peláez**, certifico que el presente trabajo de titulación realizado por las Srtas. **ANA BELÉN ASTUDILLO MEJÍA** y **JOHANNA GABRIELA LANDI VILLA**, egresadas de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, carrera de INGENIERÍA CIVIL, fue desarrollado bajo mi supervisión y tutoría con el tema: **“EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE IMPERMEABILIZACIÓN EN RELLENOS SANITARIOS: CASO PICHACAY – CUENCA”**.



---

**Ing. José Luis Solano Peláez**  
**CI.:0103101937**  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios y a la Virgen, por su guía y protección constante, que hicieron posible la culminación de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi mamá, Lola, por cada abrazo, cada palabra de aliento y cada noche de desvelo conmigo. Gracias por ser mi roca, mi alegría y mi inspiración constante.

A Gaby, compañera de tesis y de camino, por su entrega, apoyo y amistad sincera que hicieron posible este logro compartido.

Al Ing. José Solano, por su apoyo y compromiso como tutor, que marcaron un impacto importante en la realización de esta tesis. Igualmente, a la Ing. Fabiola Uday, por su conocimiento, experiencia y valiosos consejos, cuya guía dejó una huella significativa en mi formación profesional y personal.

A la empresa EMAC, por abrirnos sus puertas y confiarnos información que se convirtió en la esencia de esta investigación. Su colaboración fue una chispa que encendió la construcción de este sueño académico hecho realidad.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y sus palabras siempre oportunas. Gracias por acompañarme en este viaje y hacer que cada obstáculo fuera más fácil de superar.

Ana Belén Astudillo Mejía.

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nada, agradezco a Dios, quien fue mi fuente de sabiduría y fortaleza a lo largo de este camino. Estoy profundamente agradecida por las bendiciones que me ha otorgado y por la paz que me ha brindado en momentos de incertidumbre.

A mis padres, por ser el pilar fundamental en cada etapa de mi vida. Su apoyo incondicional, emocional y económico ha sido una fuente constante de fortaleza y motivación que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

A mi compañera y amiga de tesis, Ana Belén, por haberme brindado su amistad sincera a lo largo de este camino. Gracias por compartir sus conocimientos, por el trabajo mutuo y por el compromiso constante que nos permitió superarnos día a día hasta alcanzar este importante objetivo.

A mi tutor de tesis, el Ing. José Luis Solano, por compartir generosamente su experiencia y conocimientos a lo largo de este proceso, guiándome con paciencia y claridad en cada etapa. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a la Ing. Fabiola Carolina Uday, por su constante apoyo, orientación y valiosos aportes, que fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) y a todo su equipo profesional y operativo, por brindarme su apoyo a través de información, recursos y material técnico que fueron claves para el desarrollo y la obtención de resultados concretos en esta investigación. Su colaboración fue fundamental para dar solidez y aplicabilidad al presente trabajo.

Johanna Gabriela Landi Villa

## DEDICATORIA

A Dios, cuya luz ha guiado cada paso de mi camino en este viaje académico. Tú infinita sabiduría y tu amor incondicional me han brindado la fortaleza, el valor y la determinación necesarios para alcanzar esta meta.

A mi madre, María Dolores Mejía, cuyo amor infinito, sacrificios silenciosos y fe inquebrantable han sido la fuerza que me impulsó a no rendirme. Este logro es también tuyo, porque gracias a tu luz y tu guía hoy cumpla este sueño.

Dedico esta tesis a mis queridos tíos Gloria, Julia y Pedro Mejía, cuyo amor, apoyo y generosidad han sido mi fortaleza. Su ejemplo y cariño me han inspirado a seguir adelante, y este logro es un homenaje al impacto que han tenido en mi vida.

A la memoria de mi abuelito Julio y mi padre Miguel, cuya presencia celestial acompaña y da sentido a este triunfo.

Y a mi pequeño hijo Ian, luz pura que ilumina mis días y eterna inspiración de mi vida. Tú sonrisa ha sido mi refugio, tu amor mi motor y tu existencia la razón más hermosa para seguir soñando y luchando. Cada esfuerzo en este camino lo he hecho pensando en ti, y este logro lleva grabado tu nombre en lo más profundo de mi corazón.

Ana Belén Astudillo Mejía.

## DEDICATORIA

A mi amado padre, Manuel Redentor Landi Landi, quien ha trabajado incansablemente para hacer realidad mis sueños. Gracias por ser mi fortaleza y ejemplo de perseverancia. Tu dedicación y esfuerzo para brindarme las herramientas necesarias han sido fundamentales en mi crecimiento personal y académico. Gracias por creer en mí, por animarme a seguir adelante y por estar siempre a mi lado, en las buenas y en las malas.

A mi amada madre, Zoila Beatriz Villa Uzho, mi apoyo incondicional, mi refugio y mi confidente. Gracias, mami, por cada palabra de aliento, por secar mis lágrimas en los momentos más difíciles y por recordarme siempre que soy capaz de superar cualquier obstáculo. Este logro es el resultado de tu amor, tu ejemplo y tu entrega.

A mis hermanos, Isabel, Nelson y Fernando, quienes han sido una fuente constante de apoyo a lo largo de este proceso. Agradezco sus palabras de ánimo, cada conversación y cada risa compartida. Este logro también es de ustedes.

A mis queridos abuelos, Polivio y Mercedes, que me brindaron siempre sus consejos y palabras de aliento. Gracias por ser como mis segundos padres y por enseñarme tanto con su amor sencillo y profundo.

A mi novio, John Carlos, por ser mi compañero desde el inicio de este proceso, por caminar a mi lado con amor, paciencia y firmeza. Gracias por crecer conmigo, por esperarme con el corazón sereno y por no soltar nunca mi mano. Te agradezco por escucharme, animarme y recordarme siempre todo lo que soy capaz de lograr.

Y a mis compañer@s de camino, con quienes compartí largas jornadas de estudio, risas y logros. Gracias por su compañía y por conservar la amistad por encima de todo.

Johanna Gabriela Landi Villa

## RESUMEN

El estudio analiza la contaminación ambiental causada por los lixiviados en los rellenos sanitarios, tomando como caso el de Pichacay, en Cuenca. Estos líquidos presentan alta carga orgánica y mineral (DQO 8119 mg/L, DBO 249 mg/L, sólidos disueltos 15.600 mg/L), representando riesgo de infiltración al suelo y aguas subterráneas. El objetivo fue evaluar métodos de impermeabilización mediante modelos físicos y ensayos con lixiviado real, para determinar la alternativa más viable técnica, normativa y económicamente. Se aplicó un diseño experimental con ocho configuraciones de materiales impermeabilizantes bajo condiciones controladas. Los resultados mostraron que los sistemas con recubrimiento completo mantuvieron contención total del lixiviado durante las diez semanas de monitoreo experimental. Este periodo no busca limitar la efectividad del sistema a dicho lapso, sino demostrar de manera controlada su desempeño hidráulico y estabilidad inicial, verificando el cumplimiento del coeficiente de permeabilidad establecido por la NTE INEN 2641:2012 ( $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s). En particular, la geomembrana de polietileno de alta densidad y el sistema compuesto mostraron mayor eficiencia y estabilidad, por lo que se recomiendan para municipios que aún no cuentan con rellenos sanitarios.

*Palabras clave:* lixiviados, relleno sanitario, impermeabilización, geomembrana HDPE, sostenibilidad ambiental.

## ABSTRACT

This study analyzes the environmental pollution caused by leachate in sanitary landfills, taking the Pichacay landfill in Cuenca as a case study. These liquids have a high organic and mineral load (COD 8119 mg/L, BOD 249 mg/L, total dissolved solids 15,600 mg/L), posing a risk of infiltration into the soil and groundwater. This paper aims to evaluate waterproofing methods using physical models and tests with actual leachate, to identify the most technically, regulatory, and economically viable alternative. An experimental design was applied with eight configurations of waterproofing materials under controlled conditions. The results showed that the fully lining systems maintained a total leachate containment throughout the ten-week experimental monitoring. This period was not intended to limit the effectiveness of the system to that timeframe, but rather to demonstrate its hydraulic performance and initial stability in a controlled manner, verifying compliance with the permeability coefficient established by NTE INEN 2641:2012 ( $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s). In particular, the High-Density Polyethylene (HDPE) geomembrane and the composite system demonstrated greater efficiency and stability; therefore, they are recommended for municipalities that do not yet have sanitary landfills.

*Keywords:* Leachate, sanitary landfill, waterproofing, HDPE geomembrane, environmental sustainability

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD .....	I
CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA .....	V
DEDICATORIA .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XV
LISTA DE ANEXOS.....	XVI
CAPÍTULO I .....	- 18 -
1. INTRODUCCIÓN .....	- 18 -
1.1 Contextualización de la problemática ambiental en rellenos sanitarios.....	- 18 -

<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>- 20 -</b>
1.2.1	Objetivo General.....	- 20 -
1.2.2	Objetivos específicos .....	- 20 -
<b>CAPÍTULO II .....</b>		<b>- 21 -</b>
<b>2.</b>	<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>2.1</b>	<b>Rellenos sanitarios.....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>2.2</b>	<b>Componentes básicos de un relleno sanitario.....</b>	<b>- 21 -</b>
<b>2.3</b>	<b>Función de la impermeabilización dentro del diseño .....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>2.4</b>	<b>Fundamentos de impermeabilización en rellenos sanitarios.....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>2.5</b>	<b>Generación de lixiviados .....</b>	<b>- 23 -</b>
<b>2.6</b>	<b>Consecuencias generadas por la contaminación con lixiviado.....</b>	<b>- 24 -</b>
<b>2.7</b>	<b>Caracterización físico-química del lixiviado.....</b>	<b>- 25 -</b>
<b>2.8</b>	<b>Métodos de impermeabilización en rellenos sanitarios .....</b>	<b>- 26 -</b>
2.8.1	Geomembranas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE).....	- 27 -
2.8.2	Arcilla Compactada .....	- 28 -
2.8.3	Sistema compuesto: (arcilla + geomembrana) .....	- 29 -
2.8.4	Bentonita sódica .....	- 29 -
<b>2.9</b>	<b>Normativa técnica y ambiental vigente .....</b>	<b>- 30 -</b>
<b>2.10</b>	<b>Casos de estudio relevantes .....</b>	<b>- 32 -</b>
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS (METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN).....</b>	<b>- 35 -</b>
3.1.1	Enfoque metodológico: aplicado, técnico-comparativo y experimental.....	- 35 -

<b>3.2</b>	<b>Revisión técnica, normativa y económica de métodos existentes.....</b>	<b>- 36 -</b>
<b>3.3</b>	<b>Selección de métodos mediante matriz multicriterio.....</b>	<b>- 37 -</b>
<b>3.4</b>	<b>Construcción de modelos físicos .....</b>	<b>- 39 -</b>
3.4.1	Armado de Modelos experimentales .....	- 40 -
3.4.2	Capa de drenaje y preparación de los Modelos experimentales.....	- 42 -
3.4.3	Colocación de la capa de geotextil.....	- 43 -
3.4.4	Colocación de los métodos de impermeabilización.....	- 45 -
<b>3.5</b>	<b>Recolección y aplicación controlada de lixiviado real.....</b>	<b>- 54 -</b>
3.5.1	Análisis del lixiviado previo al vertido experimental .....	- 55 -
3.5.2	Zona de estudio .....	- 55 -
3.5.3	Metodología de caracterización .....	- 58 -
3.5.4	Monitoreo semanal y control técnico de los modelos experimentales.....	- 59 -
3.5.5	Riego de lixiviado en los modelos experimentales .....	- 60 -
<b>3.6</b>	<b>Evaluación del desempeño: escurrimiento, retención y fugas.....</b>	<b>- 61 -</b>
<b>3.7</b>	<b>Análisis comparativo técnico, normativo y económico .....</b>	<b>- 62 -</b>
<b>3.8</b>	<b>Procesamiento de datos y criterios de análisis.....</b>	<b>- 64 -</b>
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>- 66 -</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>- 66 -</b>
<b>4.1</b>	<b>Evaluación general.....</b>	<b>- 66 -</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados específicos .....</b>	<b>- 67 -</b>
4.2.1	Identificación y selección de métodos de impermeabilización .....	- 67 -
4.2.2	Arcilla Compactada .....	- 68 -
4.2.3	Sistema Compuesto (Arcilla + Geomembrana).....	- 71 -

4.2.4 Bentonita Sódica .....	- 73 -
4.2.5 Geomembrana HDPE .....	- 76 -
<b>4.3 Comparativa entre métodos .....</b>	<b>- 80 -</b>
4.3.1 Comparación técnica .....	- 80 -
4.3.2 Comparación normativa .....	- 81 -
4.3.3 Comparación económica .....	- 83 -
4.3.4 Análisis Global.....	- 84 -
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>5.1 Conclusiones.....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>5.2 Recomendaciones.....</b>	<b>- 91 -</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>- 93 -</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>- 97 -</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Armado de modelos experimentales _____	- 40 -
<b>Figura 2:</b> Configuración con recubrimiento solo en la base _____	- 41 -
<b>Figura 3:</b> Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención. _____	- 42 -
<b>Figura 4:</b> Capa de drenaje _____	- 43 -
<b>Figura 5:</b> Primera capa geotextil _____	- 44 -
<b>Figura 6:</b> Segunda capa geotextil _____	- 44 -
<b>Figura 7:</b> Método del sistema (arcilla compactada) _____	- 46 -
<b>Figura 8:</b> Método del sistema compuesto _____	- 47 -
<b>Figura 9:</b> Método de impermeabilización con Bentonita Sódica _____	- 49 -
<b>Figura 10:</b> Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) _____	- 51 -
<b>Figura 11:</b> Primera configuración del geotextil _____	- 52 -
<b>Figura 12:</b> Segunda configuración del geotextil _____	- 52 -
<b>Figura 13:</b> Colocación de la capa de residuos simulados _____	- 53 -
<b>Figura 14:</b> Llenado de modelos experimentales _____	- 54 -
<b>Figura 15:</b> Relleno sanitario Santa Ana _____	- 56 -
<b>Figura 16:</b> Relleno sanitario de Pichacay _____	- 56 -
<b>Figura 17:</b> Vista aérea del relleno sanitario de Pichacay _____	- 57 -
<b>Figura 18:</b> Desperdicios en el relleno sanitario de Pichacay _____	- 58 -
<b>Figura 19:</b> Riego de lixiviado en los modelos experimentales _____	- 61 -
<b>Figura 20:</b> DQO en arcilla compactada _____	- 69 -
<b>Figura 21:</b> Registro semanal del filtrado en arcilla compactada _____	- 70 -
<b>Figura 22:</b> Comparación de modelos _____	- 71 -
<b>Figura 23:</b> Registro del volumen semanal de la arcilla + geomembrana _____	- 72 -
<b>Figura 24:</b> Comparación de modelos _____	- 73 -
<b>Figura 25:</b> Registro semanal del volumen de la Bentonita Sódica _____	- 74 -

<b>Figura 26: DQO de la bentonita sódica</b>	<b>- 75 -</b>
<b>Figura 27: Comparación de modelos</b>	<b>- 76 -</b>
<b>Figura 28: Registro semanal del volumen de la geomembrana HDPE</b>	<b>- 77 -</b>
<b>Figura 29: DQO geomembrana HDPE</b>	<b>- 79 -</b>
<b>Figura 30: Comparación de modelo.</b>	<b>- 80 -</b>
<b>Figura 31: Evaluación global de métodos de impermeabilización</b>	<b>- 86 -</b>
<b>Figura 32: Desempeño de los métodos de impermeabilización</b>	<b>- 88 -</b>

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** *Caracterización físico-química del lixiviado* \_\_\_\_\_ - 59 -
- Tabla 2:** *DQO muestra pura* \_\_\_\_\_ - 78 -
- Tabla 3.** *DQO Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)* \_\_\_\_\_ - 78 -
- Tabla 4.** *Matriz de evaluación global de métodos de impermeabilización* \_\_\_\_\_ - 85 -

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Armado de modelos experimentales.....	- 97 -
<b>Anexo 2.</b> Configuración con recubrimiento solo en la base.....	- 98 -
<b>Anexo 3.</b> Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.....	- 99 -
<b>Anexo 4.</b> Capa de drenaje .....	- 105 -
<b>Anexo 5.</b> Método de arcilla compactada .....	- 107 -
<b>Anexo 6.</b> Método del sistema compuesto .....	- 109 -
<b>Anexo 7.</b> Método con Bentonita Sódica .....	- 111 -
<b>Anexo 8.</b> Llenado de modelos experimentales .....	- 112 -
<b>Anexo 9.</b> Riego de lixiviados.....	- 114 -
<b>Anexo 10.</b> Instrumentos utilizados .....	- 116 -
<b>Anexo 11.</b> Recolección de muestras.....	- 117 -
<b>Anexo 12.</b> Mediciones de pH.....	- 118 -
<b>Anexo 13.</b> Ensayo de color.....	- 119 -
<b>Anexo 14.</b> Ensayo de fosforo.....	- 120 -
<b>Anexo 15.</b> Ensayo de sólidos suspendidos.....	- 121 -
<b>Anexo 16.</b> Ensayo de amoníaco .....	- 122 -
<b>Anexo 17.</b> Ensayo de nitritos .....	- 123 -
<b>Anexo 18.</b> Ensayo DQO .....	- 124 -
<b>Anexo 19.</b> Modelos experimentales evaluados.....	- 126 -
<b>Anexo 20.</b> Actividades diversas durante el desarrollo.....	- 128 -
<b>Anexo 21.</b> Caracterización físico-química del lixiviado extraído de pichacay con el método de disolución antes de vertir en los modelos experimentales.....	- 131 -
<b>Anexo 22.</b> Modelo experimental: Arcilla Compactada (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.).....	- 132 -

**Anexo 23.** *Modelo experimental: Arcilla Compactada. (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.)* ..... - 138 -

**Anexo 24.** *Modelo experimental: Método del sistema compuesto (Arcilla+ Geomembrana), (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)* ..... - 141 -

**Anexo 25.** *Modelo experimental: Método del sistema compuesto (Arcilla+ Geomembrana).(Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención. )* ..... - 144 -

**Anexo 26.** *Modelo experimental: Bentonita Sódica POWERGROUND. (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)*..... - 147 -

**Anexo 27.** *Modelo experimental: Bentonita Sódica POWERGROUND. (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.)* ..... - 151 -

**Anexo 28.** *Modelo experimental: Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE).(Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)* ..... - 157 -

**Anexo 29.** *Modelo experimental: Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención. )* ..... - 164 -

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Contextualización de la problemática ambiental en rellenos sanitarios

En América Latina, la disposición final de residuos sólidos urbanos ha representado históricamente un desafío ambiental y sanitario. El crecimiento acelerado de las ciudades, la generación masiva de residuos y la falta de planificación técnica han derivado en la proliferación de rellenos sanitarios que, en muchos casos, no cumplen con criterios adecuados de confinamiento y tratamiento de lixiviados. Esta situación genera riesgos significativos para los ecosistemas locales y las comunidades aledañas (Cárdenas-Valbuena et al., 2022).

Los lixiviados, como subproductos líquidos de la descomposición de residuos, poseen una alta carga contaminante. Su migración hacia el suelo o cuerpos hídricos subterráneos y superficiales compromete gravemente la calidad ambiental del entorno. En países como Ecuador, Perú y Colombia, estudios han demostrado que la infiltración no controlada de estos líquidos altera las características fisicoquímicas del suelo, provocando acumulación de metales pesados y alteración de la biota edáfica (Muñoz & Sánchez, 2013; López-Vega et al., 2021).

Además, la operación deficiente de celdas en rellenos sanitarios sin sistemas impermeabilizantes eficaces favorece la formación de plumas contaminantes que pueden extenderse decenas de metros en el subsuelo. Esta amenaza se agrava en zonas con alta pluviosidad o con suelos de alta permeabilidad, como los andisoles, comunes en regiones montañosas del Ecuador. En tales contextos, el impacto se multiplica debido a la facilidad con la que el lixiviado percola y alcanza acuíferos sensibles (Zafra-Mejía & Romero-Torres, 2019).

Numerosas investigaciones recientes han evidenciado que la falta de criterios técnicos en la selección de materiales impermeabilizantes influye directamente en la eficacia de los sistemas de contención. La ausencia de normativas actualizadas o su escaso cumplimiento agrava este panorama. Como resultado, muchos rellenos en la región terminan siendo focos de contaminación crónica, incluso décadas después de finalizada su operación (Chávez et al., 2024).

En este contexto, resulta crucial desarrollar estudios que aborden comparativamente los distintos métodos de impermeabilización disponibles, evaluando su rendimiento en función de variables ambientales, económicas y técnicas. Solo mediante este tipo de análisis es posible avanzar hacia una gestión de residuos sólida, preventiva y ambientalmente responsable.

El manejo de residuos sólidos representa uno de los desafíos más persistentes para los gobiernos locales en América Latina. La falta de infraestructura adecuada, unida a limitaciones presupuestarias y técnicas, ha generado una dependencia de sistemas de disposición final poco eficientes o ambientalmente inseguros. En este contexto, los rellenos sanitarios se mantienen como la alternativa más viable, siempre que integren soluciones técnicas efectivas para la contención de lixiviados (Ziegler Rodríguez, 2019).

Modelos de estudio como el desarrollado en el relleno sanitario de Pichacay, que evalúan comparativamente distintas estrategias de impermeabilización, pueden convertirse en herramientas metodológicas replicables en otros municipios. Esta replicabilidad resulta especialmente útil para territorios de características similares, donde factores como el clima húmedo, la topografía montañosa o la presencia de suelos volcánicos determinan condiciones operativas comunes. Al validar su eficacia mediante pruebas experimentales, estos modelos aportan información práctica y directamente aplicable en la planificación de nuevas celdas o en la rehabilitación de rellenos existentes (Espinoza Rodríguez & Badilla Obando, 2023).

Diversos estudios destacan que los municipios pequeños o intermedios, al no contar con laboratorios especializados o personal técnico calificado, requieren soluciones accesibles y contextualizadas. El uso de matrices comparativas que integren criterios técnicos, económicos y normativos, como se propone en esta investigación, puede facilitar significativamente la toma de decisiones en estos entornos. Además, refuerza la transparencia en la gestión ambiental municipal, promoviendo inversiones más sostenibles y coherentes con las normativas nacionales (Gómez Quintero, 2023; Morales Rangel, 2022).

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el método de impermeabilización en el relleno sanitario de Pichacay, mediante la construcción de modelos físicos y experimentación con lixiviado real, con el fin de formular recomendaciones para su implementación en municipios que presentan condiciones similares.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Identificar los métodos de impermeabilización para rellenos sanitarios, mediante la revisión de información técnica, normativa y económica de distintos rellenos, con el fin de determinar la alternativa viable para la elaboración de modelos físicos.

Evaluar el desempeño de los métodos de impermeabilización mediante la construcción de modelos y pruebas físicos–químicas, con el propósito de analizar su eficacia en términos de retención y control de filtraciones.

Proponer el método de impermeabilización adecuado, mediante la comparación de los resultados técnicos, económicos y normativos obtenidos de cada método para su aplicación en municipios que no cuentan con infraestructura de disposición final de residuos sólidos.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 Rellenos sanitarios

Un relleno sanitario es una instalación de disposición final de residuos sólidos, diseñada y operada bajo criterios de ingeniería y normas ambientales para minimizar los impactos negativos sobre el suelo, el agua y el aire. A diferencia de los botaderos a cielo abierto, estos sistemas controlan la descarga de desechos mediante procesos planificados de compactación y cobertura diaria, evitando proliferación de vectores y generación descontrolada de contaminantes. Su objetivo principal es brindar un espacio seguro y estable para la disposición de residuos municipales, garantizando la protección de la salud pública y del entorno natural (Tchobanoglous et al., 2020).

#### 2.2 Componentes básicos de un relleno sanitario

El diseño de un relleno sanitario incorpora diversos elementos estructurales que actúan de manera integrada para asegurar su eficiencia. Entre los principales componentes destacan:

**Celdas de disposición:** Son unidades modulares donde se depositan y compactan los residuos. Cada celda cuenta con cobertura temporal de material inerte que limita olores, dispersión de desechos y presencia de animales carroñeros.

**Sistema de captación y evacuación de lixiviados:** Incluye drenes, tuberías y estanques de almacenamiento que recolectan los líquidos generados por la descomposición de los residuos y el contacto con aguas lluvias. Este sistema evita la contaminación directa del subsuelo y cuerpos de agua.

**Sistema de captación de biogás:** Está conformado por pozos y tuberías perforadas que permiten la extracción controlada de metano y dióxido de carbono. Estos gases pueden ser quemados en antorchas o aprovechados energéticamente.

Coberturas diarias y finales: Son capas de tierra u otros materiales que se colocan sobre los residuos para controlar la emisión de gases, olores y el ingreso de fauna. La cobertura final debe garantizar la clausura técnica del sitio.

Métodos de impermeabilización: Constituyen la primera barrera de protección ambiental, ubicada en la base y taludes de las celdas. Su función es limitar el paso de lixiviados hacia el subsuelo mediante materiales naturales como arcilla compactada o sistemas sintéticos como geomembranas y geo sintéticos bentoníticos.

### **2.3 Función de la impermeabilización dentro del diseño**

La impermeabilización en rellenos sanitarios cumple un rol esencial en la gestión ambiental del sitio, ya que constituye la defensa primaria frente a la migración de lixiviados hacia el suelo y las aguas subterráneas. Su adecuada implementación asegura que el sistema de captación de lixiviados opere con eficiencia, evitando filtraciones que comprometan la estabilidad estructural de la celda y la integridad del entorno. En este sentido, la selección del método impermeabilizante debe responder a criterios técnicos, económicos y normativos, garantizando un coeficiente de permeabilidad adecuado, alta durabilidad y resistencia química frente a fluidos altamente contaminantes (Yesiller & Shackelford, 2021).

### **2.4 Fundamentos de impermeabilización en rellenos sanitarios**

La impermeabilización constituye uno de los pilares fundamentales en el diseño de rellenos sanitarios, ya que actúa como una barrera física que impide la migración de lixiviados al suelo y a los cuerpos hídricos cercanos. Esta función es indispensable para garantizar la protección ambiental y la estabilidad geotécnica del sistema de disposición final (Sancandi & Soto, 2017).

Desde el punto de vista técnico, un sistema de impermeabilización eficiente debe ofrecer una resistencia elevada a la percolación, conservar sus propiedades estructurales

ante cargas mecánicas y ser químicamente inerte frente a los compuestos agresivos presentes en los lixiviados (Mendoza Salgado & López Trujillo, 2004). La correcta selección de materiales y la disposición de capas protectoras forman parte integral del diseño del sistema. En este sentido, se consideran criterios como el coeficiente de permeabilidad, la resistencia a la tracción, la durabilidad y la compatibilidad con las condiciones geológicas del sitio (Bolaños et al., 2009).

En términos prácticos, el sistema de impermeabilización suele incluir combinaciones de materiales sintéticos, como geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE), y materiales naturales, como la arcilla compactada. Esta configuración en capas busca maximizar la eficiencia hidráulica, disminuir los riesgos de fugas y prolongar la vida útil del relleno. Además, debe complementarse con sistemas de drenaje que permitan recolectar y conducir el lixiviado hacia unidades de tratamiento (Tutacano et al., 2023).

Diversas investigaciones en América Latina destacan que la efectividad del sistema depende no solo del tipo de material utilizado, sino también de su instalación adecuada y del control técnico durante la operación del relleno (Cervantes, 2021). El descuido de estas etapas incrementa significativamente el riesgo de contaminación ambiental y afecta negativamente el desempeño estructural del relleno sanitario (Florestano, 2024).

Por ello, los fundamentos de impermeabilización no deben considerarse únicamente como una medida constructiva, sino como un componente clave de la gestión ambiental integral. Su adecuada planificación e implementación condicionan directamente la sostenibilidad y seguridad del sistema de disposición final, así como el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

## **2.5 Generación de lixiviados**

Los lixiviados se forman principalmente por la percolación del agua de lluvia a través de los residuos depositados en las celdas de disposición, mezclándose con compuestos

orgánicos e inorgánicos presentes en la masa de desechos. A este aporte hídrico se suman los líquidos propios de la descomposición de la fracción orgánica, así como las reacciones químicas y microbiológicas internas. El resultado es un fluido altamente contaminante, rico en materia orgánica, sales disueltas, metales pesados y compuestos tóxicos que varían según la edad del relleno, la composición de los residuos y las condiciones climáticas locales (Kjeldsen et al., 2021).

## **2.6 Consecuencias generadas por la contaminación con lixiviado**

El lixiviado es el resultado del paso del agua, proveniente de la lluvia o de los propios residuos, a través del cuerpo de un relleno sanitario. Durante este proceso, el líquido arrastra una gran variedad de compuestos químicos, orgánicos e inorgánicos, generando un efluente altamente contaminante. Su composición depende de múltiples factores, como el tipo de residuo, la etapa de descomposición, el clima, y las características del suelo receptor (Zúñiga-Ruiz et al., 2024).

Desde un punto de vista químico, el lixiviado contiene metales pesados (como plomo, cadmio, mercurio y cromo), compuestos orgánicos biodegradables y refractarios, amoníaco, nitratos, sólidos disueltos totales, y una alta carga de DBO y DQO. Estos parámetros varían según el tiempo de operación del relleno; los lixiviados “jóvenes” tienen mayor carga orgánica, mientras que los “maduros” presentan más sales disueltas y menor biodegradabilidad (Parra & Camilo, 2021).

El comportamiento ambiental del lixiviado es altamente dinámico. Si no se controla adecuadamente, tiende a migrar hacia capas inferiores del subsuelo, contaminando acuíferos y suelos agrícolas. Esta infiltración puede provocar la pérdida de biodiversidad microbiana en el suelo, alteración del pH, salinización y movilización de metales pesados. La persistencia de estos contaminantes representa una amenaza latente para la salud humana y los ecosistemas acuáticos (CIFUENTES, 2013).

En condiciones donde la barrera impermeabilizante es deficiente o inexistente, el lixiviado puede alcanzar cuerpos de agua superficiales o subterráneos, generando focos críticos de contaminación (Carbonel, 2024). En muchos casos, estos impactos son acumulativos y de difícil remediación. Estudios recientes han documentado cómo la infiltración no controlada en zonas montañosas andinas puede ocasionar procesos de eutrofización, mortandad de especies acuáticas, y afectaciones en la calidad del agua para consumo humano (Rodríguez Cardenas, 2023).

Los riesgos asociados a la generación de lixiviado incluyen también la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente metano y dióxido de carbono. Esto ocurre debido a procesos anaerobios durante la degradación orgánica, contribuyendo significativamente al cambio climático si no se gestionan adecuadamente. Además, en zonas donde se carece de monitoreo, los lixiviados pueden desbordarse en superficie, afectando directamente áreas pobladas, agrícolas o de conservación ecológica (Cayetano Miranda, 2024).

Por ello, el control del lixiviado no solo exige sistemas de impermeabilización efectivos, sino también estrategias complementarias como sistemas de captación, tratamientos físico-químicos y monitoreo permanente. Su correcta gestión es esencial para asegurar la sostenibilidad ambiental del relleno y prevenir afectaciones a largo plazo sobre el entorno natural.

## **2.7 Caracterización físico-química del lixiviado**

El lixiviado presenta una composición variable, pero existen parámetros estándar utilizados para describir su nivel de contaminación:

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** mide la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente. Se expresa en mg/L y se calcula mediante el consumo de un agente oxidante fuerte, generalmente dicromato de potasio.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>):** representa el oxígeno requerido por los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable en cinco días. Se expresa en mg/L y se obtiene comparando el oxígeno disuelto inicial y final.

- **pH:** determina el grado de acidez o alcalinidad, influenciado por los ácidos orgánicos en lixiviados jóvenes o la presencia de carbonatos en lixiviados maduros.

- **Turbidez y color:** reflejan la concentración de partículas suspendidas y sustancias disueltas, sirviendo como indicadores visuales del grado de contaminación.

- **Sólidos totales, suspendidos y disueltos (ST, SST, SDT):** miden la carga de materiales en el lixiviado, fundamentales para evaluar procesos de sedimentación y tratamiento.

Estos parámetros permiten clasificar al lixiviado en joven (altas DQO y DBO, pH ácido, turbidez elevada) o maduro (menor biodegradabilidad, alta concentración de sales y metales), información clave para definir estrategias de impermeabilización y tratamiento.

## **2.8 Métodos de impermeabilización en rellenos sanitarios**

El diseño de un sistema impermeabilizante en un relleno sanitario requiere la selección adecuada de materiales que garanticen una barrera efectiva frente a la migración de lixiviados. Esta elección depende de factores como la permeabilidad, resistencia química, facilidad de instalación, y compatibilidad con el terreno. Entre los más utilizados se encuentran las geomembranas sintéticas, la arcilla compactada y los geos sintéticos bentoníticos (Lascano Martínez, 2020). No obstante, en el presente estudio no se implementaron los geos sintéticos, sino que, en su lugar se optó por la aplicación de un método innovador basado en bentonita sódica. Este material ha demostrado un óptimo rendimiento en reservorios, y para el contexto de la investigación, al utilizarse en rellenos sanitarios, representa un aporte técnico innovador en esta área.

### **2.8.1 Geomembranas de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)**

Las geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) representan una de las soluciones más estandarizadas en el mundo para la impermeabilización de rellenos sanitarios. Este tipo de material sintético se caracteriza por su coeficiente de permeabilidad extremadamente bajo, inferior a  $1 \times 10^{-13}$  m/s, lo que garantiza una alta capacidad de aislamiento hidráulico. Además, presentan excelente resistencia química frente a compuestos orgánicos, inorgánicos y ácidos presentes en lixiviados de alta carga contaminante (Florestano, 2024).

Uno de los atributos más valorados del HDPE es su durabilidad, que puede superar las tres décadas en condiciones de operación favorables. Esta longevidad depende de factores como la radiación UV, la temperatura, el tipo de residuos y la carga hidráulica aplicada sobre la geomembrana. Su uso es común en proyectos de gran escala debido a su eficacia comprobada en la contención de líquidos agresivos (Lascano Martínez, 2020).

Sin embargo, su correcta implementación requiere condiciones técnicas estrictas. La superficie sobre la que se instala debe estar nivelada, limpia y libre de elementos que puedan perforar o dañar el material. Las uniones entre paneles se realizan mediante soldadura térmica controlada, lo cual demanda personal especializado y equipos de alta precisión. Además, se requiere la integración de sistemas de drenaje que disminuyan las presiones hidrostáticas, especialmente en sitios de alta pluviosidad (Mendoza Salgado & López Trujillo, 2004).

A pesar de su alto costo inicial, las geomembranas HDPE ofrecen una excelente relación costo-beneficio cuando se consideran sus propiedades físico-químicas, su bajo mantenimiento y su elevada confiabilidad técnica a largo plazo.

### **2.8.2 Arcilla Compactada**

La arcilla compactada es una alternativa natural empleada ampliamente en proyectos de disposición final de residuos sólidos, especialmente en contextos donde el acceso a materiales sintéticos es limitado o los presupuestos son restringidos. Su eficacia como barrera hidráulica se basa en su estructura mineralógica, rica en partículas finas y láminas de arcilla que retienen el agua por capilaridad. Esta propiedad le permite alcanzar permeabilidades del orden de  $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-9}$  m/s, suficientes para cumplir con normativas como la INEN 2641:2012 en muchos casos (Bolaños et al., 2009).

La funcionalidad del sistema depende críticamente del control del contenido de humedad óptimo durante la colocación, así como del grado de compactación aplicado. Generalmente, se requieren espesores entre 60 y 90 cm para lograr un sellado eficiente. Además, el tipo de arcilla empleada debe tener alta plasticidad y baja contracción para evitar agrietamientos durante ciclos de secado y humedecimiento (Florestano, 2024).

A pesar de su bajo costo y disponibilidad local en muchas regiones de América Latina, la arcilla compactada presenta algunas limitaciones. Entre ellas se encuentran su vulnerabilidad a la erosión superficial, la formación de fisuras por retracción, y la pérdida de integridad frente a lixiviados con alta concentración de sales o compuestos orgánicos. Estos factores pueden reducir significativamente su vida útil como material impermeabilizante, especialmente si no se complementa con capas de protección o recubrimientos secundarios (Sancandi & Soto, 2017).

En rellenos con condiciones climáticas extremas o presencia de lixiviado joven de elevada agresividad química, su uso debe ser cuidadosamente evaluado mediante pruebas de laboratorio que simulen escenarios reales de infiltración.

### **2.8.3 Sistema compuesto: (arcilla + geomembrana)**

El sistema compuesto de impermeabilización combina una capa mineral de arcilla compactada con una geomembrana sintética, usualmente de polietileno de alta densidad (HDPE). Esta configuración aprovecha las ventajas de ambos materiales: la baja permeabilidad y capacidad de adsorción química de la arcilla, junto con la elevada resistencia mecánica y química de la geomembrana. La superposición de ambas barreras disminuye de manera significativa la posibilidad de filtraciones, incluso en caso de fisuras o defectos puntuales en la instalación (Chen et al., 2025).

La geomembrana, generalmente fabricada en polietileno de alta densidad (PEAD), actúa como la primera línea de defensa frente a la percolación de lixiviados, mientras que la capa de arcilla compactada funciona como respaldo secundario, rellenando posibles defectos en la lámina sintética y reduciendo significativamente la conductividad hidráulica del sistema en su conjunto (Caiza et al., 2018). Esta sinergia reduce en varios órdenes de magnitud el coeficiente de permeabilidad en comparación con el uso de cualquiera de los dos materiales por separado (ANDRADE, 2020).

En América Latina, su implementación ha demostrado ser una alternativa viable en rellenos sanitarios de mediana y gran escala, particularmente en Ecuador, donde proyectos recientes han adoptado esta técnica como parte de las exigencias normativas ambientales y de gestión sostenible de residuos (Flores Jiménez & Ruiz Albiño, 2025). La experiencia local señala que este sistema contribuye a mejorar la estabilidad geotécnica del relleno, prolongar su vida útil y reducir el impacto ambiental asociado a la generación de lixiviados.

### **2.8.4 Bentonita sódica**

La bentonita sódica es una arcilla de origen volcánico caracterizada por su alto contenido de montmorillonita, mineral que le confiere una capacidad única de hinchamiento y formación de geles impermeables en presencia de agua. Esta propiedad de autosellado la convierte en un material innovador para la impermeabilización de rellenos sanitarios, ya

que puede reducir el coeficiente de permeabilidad hasta valores del orden de  $10^{-9}$  m/s, comparables o incluso superiores a los de las arcillas compactadas tradicionales (Jo et al., 2001).

En aplicaciones de gestión de lixiviados, la bentonita sódica se utiliza como capa de sellado primaria o secundaria. Su capacidad de expandirse y rellenar microfisuras o irregularidades en el terreno asegura una contención más confiable, incluso cuando se presentan asentamientos diferenciales o cargas variables propias del relleno sanitario (Shackelford et al., 2000). A diferencia de otros sistemas impermeabilizantes que dependen exclusivamente de la integridad de un material continuo (como geomembranas), la bentonita puede adaptarse dinámicamente a las condiciones del medio, disminuyendo el riesgo de fugas.

Una de sus aplicaciones más innovadoras se encuentra en su combinación con otros materiales impermeabilizantes, actuando como respaldo en sistemas compuestos o como aditivo en mezclas con suelos locales para mejorar sus propiedades hidráulicas (Daniel, 1997). En América Latina, investigaciones recientes han demostrado que la bentonita sódica, comercializada bajo distintas marcas, puede integrarse en sistemas de confinamiento de lixiviados con alta eficiencia y costo relativamente competitivo frente a soluciones sintéticas importadas.

## **2.9 Normativa técnica y ambiental vigente**

La gestión de rellenos sanitarios en Ecuador está regulada por un conjunto de normas técnicas y disposiciones ambientales que buscan garantizar el diseño y operación segura de infraestructuras de disposición final de residuos. Entre estas, destacan la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2641:2012 y el Código Orgánico del Ambiente (COA), que establecen los criterios mínimos para sistemas de impermeabilización y control de lixiviados (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2021).

La NTE INEN 2641:2012 establece los requisitos técnicos esenciales para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios. En cuanto a la impermeabilización, exige que el fondo de las celdas activas cuente con una barrera de baja permeabilidad, compuesta por materiales naturales compactados o geosintéticos. Esta capa debe poseer un coeficiente de permeabilidad inferior a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, lo que busca prevenir la infiltración de lixiviados al subsuelo. Además, la norma requiere la implementación de sistemas de drenaje sobre la capa impermeable, que permitan recolectar el lixiviado generado y conducirlo hacia una unidad de tratamiento o almacenamiento (INEN, 2012).

Asimismo, la norma contempla la posibilidad de utilizar sistemas combinados, donde se superpongan geomembranas HDPE sobre arcilla compactada. Esta alternativa es recomendada especialmente para zonas con alta precipitación o suelos de alta permeabilidad, como los presentes en la región andina. La norma también detalla parámetros técnicos para la instalación, tales como la inclinación de fondo mínima del 2% para facilitar el escurrimiento, y la verificación de la calidad de soldaduras mediante pruebas de vacío o presión (INEN, 2012).

Por su parte, el Código Orgánico del Ambiente (COA), promulgado en el año 2017 y reformado en 2020, es la ley marco de la gestión ambiental en el país. En su Libro IV, Título IV, establece las disposiciones para el manejo integral de residuos sólidos no peligrosos, incluyendo los requisitos para la fase de disposición final. Según el COA, los sitios de disposición deben garantizar que no se afecten cuerpos de agua, suelos, ni la salud humana, y para ello, se exige que las celdas de los rellenos sanitarios incorporen barreras impermeables, drenajes, y sistemas de monitoreo ambiental (Asamblea Nacional del **Ecuador**, 2020).

El COA también establece obligaciones de seguimiento mediante planes de manejo ambiental, así como la necesidad de realizar auditorías periódicas que evalúen el estado de las barreras impermeabilizantes y el comportamiento del lixiviado. Las autoridades

ambientales tienen la facultad de suspender o sancionar proyectos que incumplan estos parámetros, especialmente si generan afectaciones al entorno natural o a las comunidades cercanas.

La interacción entre estas dos normativas —una de carácter técnico (INEN 2641:2012) y otra de naturaleza legal y ambiental (COA)— proporciona el marco regulatorio que guía los proyectos de infraestructura sanitaria en el país. Su cumplimiento es obligatorio para nuevas obras y para la operación de celdas existentes, lo que resalta la necesidad de diseños adaptados a las condiciones geotécnicas locales y respaldados por estudios técnicos detallados.

## **2.10 Casos de estudio relevantes**

En América Latina, la implementación de rellenos sanitarios con sistemas de impermeabilización adecuados ha tenido resultados variados, debido a las diferencias geográficas, presupuestarias y técnicas entre regiones. Diversos estudios de caso permiten identificar las lecciones aprendidas y evaluar la efectividad de los materiales y sistemas utilizados para contener lixiviados.

En Ecuador, el relleno sanitario de Lago Agrio fue objeto de un análisis exhaustivo sobre su sistema de tratamiento de lixiviados. Se determinó que el uso de arcilla compactada en la base tuvo limitaciones frente a lixiviados con alta carga orgánica, lo que llevó a complementarlo con geomembranas para reforzar la barrera hidráulica. El estudio concluyó que la combinación de barreras es más efectiva en zonas con alta pluviosidad como la Amazonía (CIFUENTES, 2013).

Otro ejemplo relevante es el del relleno sanitario de Jipijapa, en la provincia de Manabí. La evaluación posterior al cierre técnico evidenció problemas estructurales relacionados con la falta de monitoreo de la impermeabilización original. Esto provocó filtraciones subterráneas detectadas mediante pruebas de infiltración en campo. A raíz de

ello, se propuso un modelo hidrológico para predecir la generación de lixiviados y establecer mejores barreras de contención (Vélez Párraga et al., 2022).

A nivel regional, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha documentado experiencias de rellenos en países como Colombia, Perú, Brasil y México. Un informe de 2023 destaca que, aunque la impermeabilización con HDPE es una práctica extendida, su eficacia depende del control de calidad en la instalación. En el caso de Colombia, el relleno sanitario “Doña Juana” en Bogotá presentó fallos iniciales por malas soldaduras, lo que derivó en reformulaciones normativas sobre inspección de geomembranas (Correal et al., 2023)

En el cantón Paján (Ecuador), se propuso la impermeabilización con arcilla local estabilizada con cemento, debido a la escasa disponibilidad de geosintéticos. El estudio determinó que la mezcla obtenida presentaba permeabilidad aceptable, pero requería un estricto control en su compactación y protección contra erosión superficial (Macías Fuentes, 2011).

Por su parte, en la ciudad de Ambato, un análisis del relleno sanitario local reveló que los lixiviados generados eran de tipo joven con alto contenido de DQO. Se recomendó actualizar el sistema de impermeabilización con HDPE doble y un GCL inferior, tras detectar fisuras en la geomembrana original. Este estudio enfatiza la necesidad de mantenimiento periódico para asegurar el desempeño a largo plazo (David & Fabara, 2011). Si bien no es posible realizar mantenimiento directo a la geomembrana al estar enterrada, se aplican medidas preventivas como el monitoreo de los ductos de recolección de lixiviados, inspecciones de control en los pozos de monitoreo, y mantenimiento en las cámaras de inspección. Adicionalmente, se recomienda la instalación de una capa de geotextil o neumáticos usados como protección mecánica de la geomembrana, a fin de evitar daños por cargas puntuales o desplazamientos de material. Estas acciones permiten

detectar fallas tempranas, reducir el riesgo de fisuras y extender la vida útil del sistema de impermeabilización

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS (Metodología de la Investigación)

#### 3.1.1 Enfoque metodológico: aplicado, técnico-comparativo y experimental

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico de carácter aplicado, con el objetivo de ofrecer soluciones prácticas a una problemática real vinculada a la gestión de lixiviados. La investigación no se limita a la descripción teórica de métodos impermeabilizantes, sino que persigue validar su desempeño mediante herramientas experimentales reproducibles. En ese sentido, se prioriza el uso de resultados tangibles que puedan ser adaptados a realidades similares en otros municipios.

La aproximación seguida también es de tipo técnico-comparativo, ya que se evalúan distintos métodos de impermeabilización en condiciones controladas. Esta comparación no solo considera variables hidráulicas como el volumen filtrado o el tiempo de escurrimiento, sino también criterios económicos, normativos y constructivos. De este modo, se garantiza una evaluación integral que supera las limitaciones de estudios puramente teóricos o normativos.

La metodología empleada en esta investigación se basó y adaptó del estudio de Kmick et al. (2021), titulado “Análisis comparativo de la efectividad y eficiencia de tres sistemas de impermeabilización”, el cual evaluó el desempeño de diferentes materiales impermeabilizantes (emulsión asfáltica, resina acrílica y resina termoplástica) mediante ensayos de estanqueidad, absorción por inmersión, capilaridad y envejecimiento acelerado bajo condiciones controladas. Este enfoque metodológico proporcionó un marco comparativo sólido para el análisis experimental de la eficiencia hidráulica y la durabilidad de distintos materiales impermeabilizantes.

En el presente trabajo, la base metodológica fue adaptada al contexto de los rellenos sanitarios, considerando las particularidades del comportamiento del lixiviado real

y las condiciones de operación del sitio de estudio. Las principales modificaciones introducidas fueron: (i) el uso de lixiviado joven real proveniente del Relleno Sanitario de Pichacay, en lugar de soluciones sintéticas, para garantizar representatividad en las pruebas; (ii) la implementación de dos configuraciones constructivas: sistema abierto (impermeabilización solo en la base) y sistema cerrado (impermeabilización en base y paredes), simulando escenarios reales de confinamiento de lixiviados; (iii) la evaluación comparativa de cuatro materiales: arcilla compactada, bentonita sódica PowerGround, geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) y sistema compuesto arcilla + geomembrana; y (iv) la verificación de cumplimiento normativo con la NTE INEN 2641:2012, en relación con el coeficiente máximo de permeabilidad permitido para barreras de baja permeabilidad ( $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s).

Estas adaptaciones permitieron trasladar el esquema comparativo original de Kmick et al. (2021) a un escenario representativo de la operación de rellenos sanitarios, manteniendo la rigurosidad experimental y la trazabilidad de resultados. En consecuencia, el método aplicado garantiza la validez técnica y normativa del proceso de evaluación de los sistemas de impermeabilización.

Finalmente, el enfoque es experimental, dado que la investigación se sustenta en la construcción de modelos físicos a escala que simulan condiciones reales de operación de un relleno sanitario. Estos modelos experimentales reproducen fielmente la disposición de capas y materiales, sobre los cuales se aplica lixiviado real proveniente del sitio de estudio. La observación directa del comportamiento del lixiviado permite validar hipótesis técnicas y sustentar recomendaciones basadas en evidencia.

### **3.2 Revisión técnica, normativa y económica de métodos existentes**

La primera fase de la investigación consistió en una revisión documental orientada a identificar, describir y analizar los métodos de impermeabilización utilizados en rellenos sanitarios a nivel regional. Esta etapa se basó en fuentes científicas, técnicas y normativas

provenientes de América Latina, priorizando estudios posteriores al año 2020. Se consultaron artículos académicos, tesis especializadas, manuales de diseño, regulaciones nacionales y experiencias prácticas documentadas en informes institucionales.

Desde el enfoque técnico, se identificaron materiales ampliamente utilizados como la geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), la arcilla compactada, los geosintéticos bentoníticos (GCLs) y mezclas estabilizadas como suelo-cemento. Cada uno de estos métodos fue evaluado con base en su coeficiente de permeabilidad, durabilidad esperada, resistencia química y facilidad de aplicación. Se incorporaron también aspectos de control constructivo y requerimientos específicos para su instalación y mantenimiento posterior.

En el análisis normativo, se consideraron estándares como la NTE INEN 2641:2012, que exige barreras con permeabilidad inferior a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, así como disposiciones establecidas en el Código Orgánico del Ambiente (COA). Estas normativas obligan a incluir barreras impermeables en todos los sitios de disposición final de residuos sólidos, garantizando la contención de lixiviados y la protección del subsuelo. La revisión permitió contrastar los métodos con los requisitos mínimos legales, verificando su nivel de cumplimiento frente a la normativa ecuatoriana vigente.

Desde el punto de vista económico, se analizaron los costos de adquisición, transporte, instalación y mantenimiento de cada alternativa. También se evaluaron las exigencias logísticas y operativas de cada método, considerando la disponibilidad de materiales en el contexto local. Este análisis permitió determinar la viabilidad financiera de su implementación en municipios con recursos limitados.

### **3.3 Selección de métodos mediante matriz multicriterio**

Con base en los resultados obtenidos durante la revisión documental, se construyó una matriz multicriterio que permitió priorizar los métodos de impermeabilización más viables para su análisis experimental. Esta herramienta integró aspectos técnicos,

económicos, normativos y operativos, con el fin de asegurar una selección equilibrada y adecuada a las condiciones del estudio. La matriz se estructuró como un instrumento de evaluación objetiva que facilitó la comparación y clasificación de las alternativas más representativas.

Los criterios definidos para la evaluación fueron: coeficiente de permeabilidad, durabilidad esperada, resistencia química al lixiviado, costo de implementación, requerimientos de instalación, y nivel de cumplimiento normativo. A cada criterio se le asignó un peso relativo, determinado mediante juicio experto y precedentes documentados en literatura científica sobre gestión de residuos sólidos. Este enfoque ponderado permitió ajustar la selección a las condiciones reales del Relleno Sanitario de Pichacay y al contexto técnico de los municipios andinos.

Los métodos que obtuvieron las mejores valoraciones en la matriz fueron: arcilla compactada, geomembrana de HDPE, bentonita sódica POWERGROUND, y el sistema compuesto de arcilla + HDPE, el cual fue realizado debido a que el caso analizado es de Pichacay, zona en la cual el relleno actual posee ese método de impermeabilización. Estos sistemas mostraron un equilibrio favorable entre eficiencia hidráulica, viabilidad económica, adaptabilidad técnica y compatibilidad con normativas nacionales. Además, representaban tanto alternativas convencionales como opciones de alto desempeño ya aplicadas en rellenos sanitarios técnicos.

La inclusión del sistema compuesto respondió a su aplicación actual en el sitio de estudio, permitiendo validar su comportamiento mediante un modelo físico. Por su parte, la bentonita sódica fue considerada como un método innovador, a comparación del resto. Este criterio de adaptabilidad reforzó la aplicabilidad práctica del estudio en municipios con restricciones logísticas.

### 3.4 Construcción de modelos físicos

Para evaluar el desempeño de los métodos de impermeabilización seleccionados, se diseñaron y construyeron modelos físicos a escala reducida, reproducidos en recipientes de vidrio con dimensiones de aproximadamente 20 cm × 17 cm × 15 cm. Cada modelo experimental simula la configuración típica de un relleno sanitario en su base impermeabilizante, permitiendo observar el comportamiento del lixiviado bajo condiciones controladas. Esta técnica experimental facilita la comparación directa entre métodos, manteniendo constante el entorno físico de aplicación.

Los modelos experimentales fueron elaborados con vidrio de 3 mm de espesor, utilizando cinco piezas unidas con adhesivo impermeable para formar una estructura tipo pecera. En su interior se dispusieron sucesivamente: una capa inferior de grava drenante, un sistema de recolección de lixiviados mediante tubería de PVC perforada, el material impermeabilizante correspondiente a cada método, un geotextil de separación (en caso necesario) y una capa superior de residuos sólidos simulados. Esta configuración estandarizada permitió comparar los métodos bajo condiciones idénticas de carga y volumen de lixiviado aplicado.

Cada modelo fue construido atendiendo las especificaciones técnicas propias de su método:

- El modelo de arcilla compactada se elaboró con capas de 1 a 2 cm de espesor, hasta completar 5 a 7 cm de material compactado manualmente para alcanzar baja permeabilidad.
- En el modelo de geomembrana HDPE, se colocó una lámina continua de 1 mm de espesor, cubriendo base y paredes interiores, protegida por geotextil en ambas caras.

- Para la opción de bentonita sódica POWERGROUND, se distribuyó una capa homogénea del producto hidratado sobre una base de geotextil, simulando su comportamiento expansivo en campo.
- Finalmente, el modelo de sistema compuesto (HDPE + arcilla) integró ambas barreras en secuencia, con una capa de arcilla de 3 a 4 cm sobre la geomembrana, separadas por geotextiles de protección.

### 3.4.1 Armado de Modelos experimentales

Se realizaron los cortes correspondientes en las láminas de vidrio para conformar las maquetas experimentales, siguiendo las dimensiones previamente establecidas. Además, se integró el sistema de drenaje, el cual incluyó la instalación de una capa de grava y una tubería perforada conectada al recipiente colector, simulando las condiciones de captación de lixiviados en un relleno sanitario.



**Figura 1:** Armado de modelos experimentales

**Fuente:** elaboración propia

Para esta investigación, se emplearon dos configuraciones distintas en la construcción de las maquetas físicas. En la primera configuración, se colocó únicamente la capa de geotextil y el método de impermeabilización seleccionado (geomembrana, arcilla, bentonita o sistema compuesto) en la base de la pecera, dejando las paredes laterales sin recubrimiento, lo cual representa una condición parcialmente sellada. En la segunda configuración, además de la base, se impermeabilizaron también las paredes internas de la pecera, simulando una condición más realista del diseño de un relleno sanitario, donde se busca una contención completa del lixiviado. Esta diferencia permitió observar el comportamiento del lixiviado tanto en sistemas parcialmente sellados como en aquellos con una barrera de contención más completa.



**Figura 2:** Configuración con recubrimiento solo en la base

**Fuente:** Elaboración propia



**Figura 3:** Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.4.2 Capa de drenaje y preparación de los Modelos experimentales**

Todas los Modelos experimentales fueron construidas con una capa base de grava gruesa de 5 cm de espesor, destinada a simular el sistema de drenaje inferior. Esta capa fue colocada cuidadosamente como la primera etapa de relleno, garantizando una distribución uniforme hasta alcanzar el nivel de la tubería de captación. Es importante destacar que la tubería perforada no fue cubierta, permitiendo la libre circulación del lixiviado hacia el sistema de recolección y asegurando una adecuada observación del escurrimiento durante los ensayos experimentales.



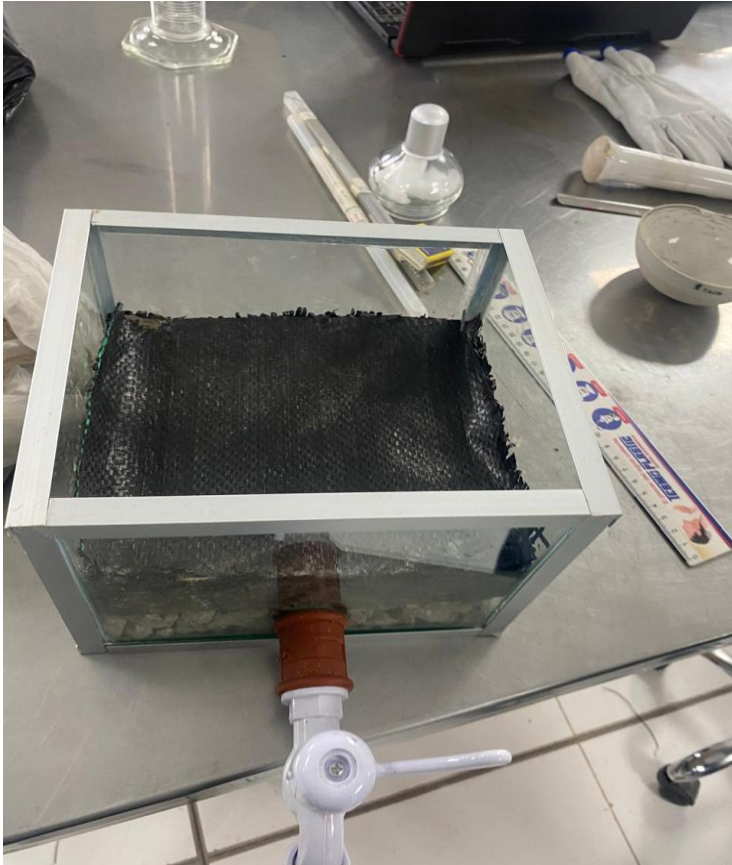
**Figura 4:** Capa de drenaje

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.4.3 Colocación de la capa de geotextil**

En todos los modelos experimentales se incorporó una capa de geotextil no tejido de 1 mm de espesor, con el objetivo de proteger el sistema impermeabilizante y evitar el arrastre de partículas finas hacia la capa de drenaje. Se emplearon dos configuraciones distintas:

En la primera, el geotextil fue colocado únicamente sobre la base de la maqueta, hasta el punto de contacto con el material impermeabilizante.



**Figura 5:** Primera capa geotextil

**Fuente:** Elaboración propia

En la segunda configuración, el geotextil se extendió también sobre las paredes internas de la pecera, cubriendo completamente las superficies laterales, lo que permitió simular un sistema de contención más integral



**Figura 6:** Segunda capa geotextil

**Fuente:** Elaboración propia

#### **3.4.4 Colocación de los métodos de impermeabilización**

Luego de preparar la base con la capa de grava y geotextil, se procedió a la instalación de los distintos métodos de impermeabilización en cada modelo experimental. Cada sistema fue colocado respetando su configuración técnica específica:

##### ***a. Método del sistema (Arcilla compactada)***

Para este modelo experimental se utilizó arcilla con alto contenido de finos, seleccionada por su baja permeabilidad y disponibilidad local, lo que la convierte en una alternativa viable para sistemas de disposición final con recursos limitados. El proceso de aplicación se realizó mediante la colocación de cuatro capas sucesivas, cada una de aproximadamente 1.25 cm, con el objetivo de alcanzar un espesor total final de 5 cm.

La arcilla fue prehumedecida ligeramente antes de su colocación para asegurar su trabajabilidad y mejorar su capacidad de compactación. Cada capa fue distribuida de forma uniforme dentro del modelo experimental, cuidando que no se generaran huecos ni diferencias de espesor. Posteriormente, se compactó manualmente con 10 golpes uniformes, utilizando un compactador adaptado a escala de laboratorio, lo que permitió alcanzar una densidad adecuada y una estructura continua sin fisuras visibles.

Este proceso fue repetido capa por capa, hasta completar la totalidad del espesor. Al finalizar la última capa, se dejó un breve periodo de reposo para permitir una ligera estabilización del material. Luego, se colocó sobre la arcilla una capa de geotextil no tejido de 1 mm, que actuó como protección frente al contacto directo con los residuos simulados.

Este sistema permitió evaluar el comportamiento hidráulico de la arcilla compactada ante la exposición continua al lixiviado, así como su resistencia estructural, retención y posibles deformaciones durante el proceso de carga progresiva en el ensayo. Se observa

que el modelo experimental fue construido por capas, pero sin contar con un recubrimiento adecuado



**Figura 7:** Método del sistema (arcilla compactada)

**Fuente:** Elaboración propia

#### ***b. Método del sistema compuesto (Arcilla+ Geomembrana)***

El sistema compuesto consistió en la implementación de dos barreras impermeables superpuestas: una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.5 mm de espesor y una capa de arcilla compactada, replicando el mismo esquema utilizado en el Relleno Sanitario de Pichacay.

El proceso de instalación inició con la colocación de la geomembrana HDPE, cuidadosamente extendida sobre la base del modelo experimental, sin pliegues ni dobleces, y anclada a las paredes interiores mediante presión manual y adhesivo especializado, simulando una contención continua. Esta capa actuó como primera barrera frente a la migración de lixiviados.

Sobre la geomembrana se colocó directamente la capa de arcilla compactada, formando la segunda barrera impermeable del sistema. La arcilla, con alto contenido de finos y previamente humedecida, fue aplicada en cuatro capas sucesivas de aproximadamente 1.25 cm cada una, hasta alcanzar un espesor total de 5 cm. Cada capa fue distribuida de manera homogénea y compactada manualmente mediante 10 golpes uniformes, garantizando una estructura densa y continua sin fisuras.

Posteriormente, se colocó una capa superior de geotextil no tejido de 1 mm para proteger el sistema compuesto del contacto directo con los residuos simulados. Esta configuración permitió evaluar el comportamiento del sistema doble bajo condiciones reales simuladas, observando su capacidad de retención, resistencia estructural y eficiencia hidráulica durante todo el periodo de exposición al lixiviado. Se observa que el modelo experimental fue construido por capas, pero sin contar con un recubrimiento adecuado que garantice la uniformidad y continuidad del sistema.



**Figura 8:** Método del sistema compuesto

**Fuente:** Elaboración propia

### ***c. Colocación del método de impermeabilización con Bentonita Sódica***

Para la implementación del método con Bentonita Sódica POWERGROUND, se aplicó una metodología detallada orientada a simular las condiciones reales de instalación en campo. El proceso comenzó con la distribución uniforme de una capa base de geotextil no tejido de 1 mm de espesor, sobre la cual se colocó el material impermeabilizante.

La bentonita sódica se aplicó en cuatro capas sucesivas, con el fin de alcanzar un espesor total aproximado de 5 cm, tal como se haría en condiciones reales de obra. En cada capa, el material en polvo fue esparcido de manera homogénea, y se procedió a una ligera hidratación mediante la aspersion de agua, simulando el contacto inicial con lixiviado. Esta hidratación favoreció la activación de las propiedades de hinchamiento del material, fundamentales para el sellado y la baja permeabilidad.

Tras cada aplicación, la capa fue compactada cuidadosamente con 10 golpes distribuidos de forma uniforme, utilizando un compactador manual adecuado para escala de laboratorio. Este procedimiento fue repetido para cada una de las cuatro capas, asegurando una estructura densa, continua y sin discontinuidades.

Una vez finalizada la colocación de las capas, se dejó reposar el sistema por 24 horas para permitir una pre-hidratación natural, antes de colocar la capa superior de protección con geotextil y la posterior carga de residuos simulados. Este método permitió observar el comportamiento del material bentonítico en condiciones progresivas de carga y humedad, evaluando su efectividad como barrera impermeabilizante en el contexto del relleno sanitario de Pichacay. Se observa que el modelo experimental fue construido por capas, pero sin contar con un recubrimiento adecuado



**Figura 9:** Método de impermeabilización con Bentonita Sódica

**Fuente:** Elaboración propia

#### ***d. Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE)***

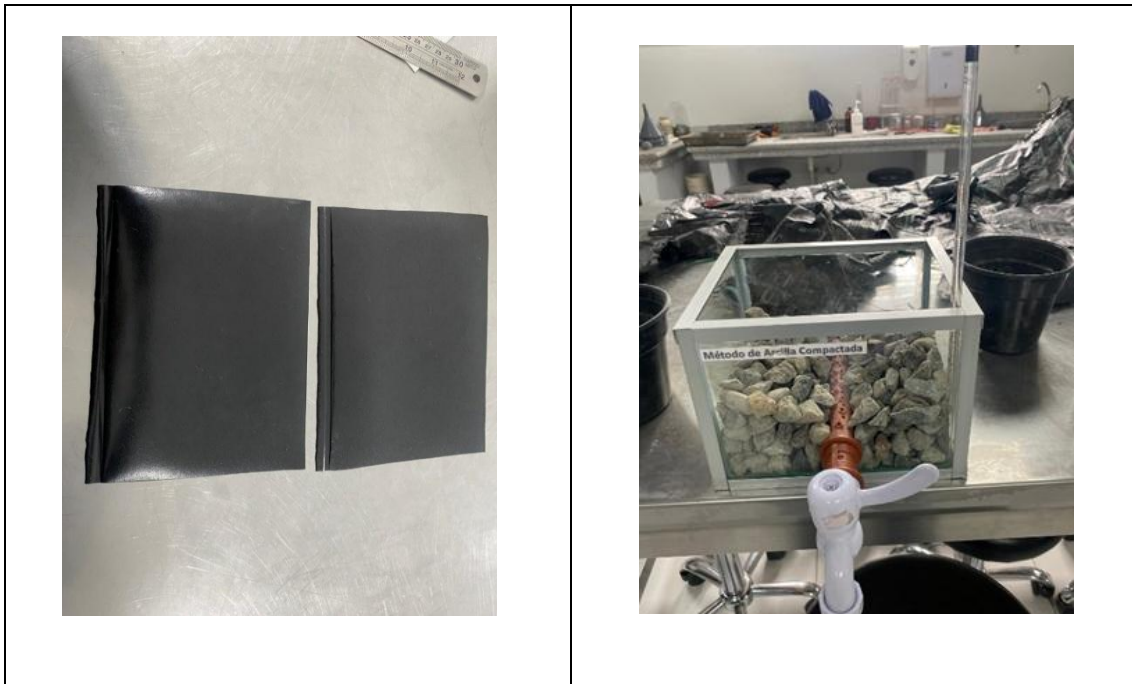
Para este modelo experimental, se empleó una lámina de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.5 mm de espesor, reconocida por su alta resistencia química, mecánica y su baja permeabilidad. La instalación se realizó con cuidado, asegurando que la geomembrana quedara completamente extendida sobre la base del modelo experimental, sin pliegues ni arrugas, a fin de evitar puntos de tensión o acumulación de lixiviado.

En una de las configuraciones, la geomembrana fue instalada únicamente en la superficie inferior (base), simulando un sistema de impermeabilización parcial, tal como ocurre en ciertos diseños básicos de relleno sanitario. En una segunda configuración, la lámina fue extendida también hacia las paredes internas de la pecera, cubriéndolas

completamente hasta el borde superior, con lo cual se simuló un sistema de doble contención más cercano a lo que exige un relleno sanitario técnico.

La fijación de la geomembrana se realizó mediante el uso de adhesivos específicos y presión manual, asegurando que los bordes quedaran bien sellados contra las paredes de vidrio de la maqueta. En las esquinas se aplicaron cortes diagonales y dobleces controlados para evitar tensiones que pudieran provocar filtraciones. Se observa que el modelo experimental fue construido por capas, pero sin contar con un recubrimiento adecuado.





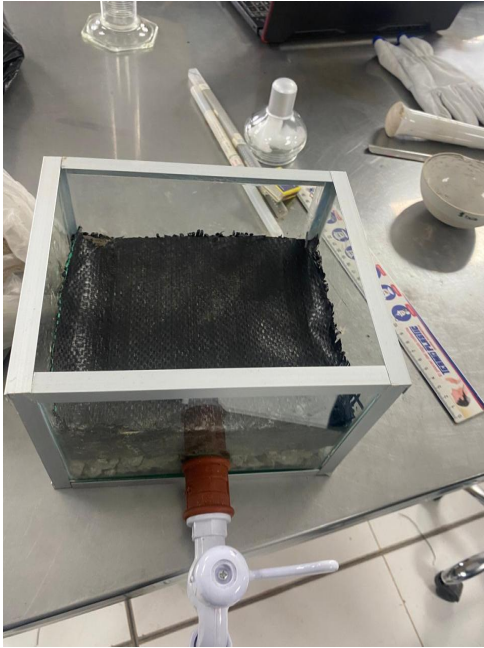
**Figura 10:** Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE)

**Fuente:** Elaboración propia

#### ***e. Colocación final del geotextil sobre el sistema impermeabilizante***

Una vez instalado el método de impermeabilización correspondiente en cada modelo experimental, se procedió a colocar una capa de geotextil no tejido de 1 mm de espesor con el fin de proteger el sistema impermeabilizante y evitar su contacto directo con los residuos simulados. Se aplicaron dos configuraciones diferenciadas:

En la primera configuración, el geotextil fue colocado únicamente sobre la superficie del material impermeabilizante, sirviendo como barrera de protección entre este y la capa de residuos. La basura se pesó antes de verterla en los modelos, registrando un peso de 1,8 kg.



**Figura 11:** Primera configuración del geotextil

**Fuente:** Elaboración propia

En la segunda configuración, el geotextil fue extendido también sobre las paredes internas de la pecera, cubriendo completamente las superficies laterales, con el objetivo de reforzar el confinamiento del sistema y simular un recubrimiento más completo como el que se aplicaría en un relleno sanitario real.



**Figura 12:** Segunda configuración del geotextil

**Fuente:** Elaboración propia

#### ***f. Colocación de la capa de residuos simulados***

Una vez instalada y protegida la capa de impermeabilización con geotextil, se procedió a la colocación de la capa de residuos simulados en todos los modelos experimentales. Esta capa estuvo compuesta por una mezcla representativa de materiales orgánicos e inertes, tales como restos vegetales, papel, fragmentos plásticos y otros desechos comunes, con el fin de simular el comportamiento real de los residuos sólidos urbanos depositados en un relleno sanitario.

El material fue colocado cuidadosamente en capas sucesivas hasta alcanzar una altura aproximada de 5 a 7 cm, asegurando una distribución homogénea dentro del modelo experimental. Esta etapa permitió evaluar la interacción directa entre los residuos y el sistema de impermeabilización, así como observar los efectos del escurrimiento y la generación de lixiviado bajo condiciones controladas de laboratorio. Se observa la deposición de basura en el primer modelo experimental, el cual no contaba con recubrimiento, lo que evidencia la exposición directa del material de relleno.



**Figura 13:** Colocación de la capa de residuos simulados

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se presentan las imágenes que documentan el proceso de llenado de los modelos experimentales, en las cuales se observa la forma en que se fue depositando la basura de manera controlada y siguiendo el procedimiento establecido para la etapa experimental. Estas fotografías constituyen un registro visual que respalda la metodología aplicada y permite evidenciar cada una de las fases del llenado.



**Figura 14:** Llenado de modelos experimentales

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.5 Recolección y aplicación controlada de lixiviado real**

La fase experimental incluyó el uso de lixiviado real proveniente del Relleno Sanitario de Pichacay, con el objetivo de replicar fielmente las condiciones operativas a las que están expuestos los sistemas de impermeabilización. La utilización de este fluido contaminante permitió evaluar el comportamiento químico y físico de cada material bajo un entorno representativo y no simulado. Este enfoque refuerza la validez externa de los resultados obtenidos en el estudio.

La recolección del lixiviado se realizó en puntos previamente identificados dentro del sistema de drenaje del relleno, seleccionando zonas activas en las que el contenido orgánico del residuo es alto. Se recolectó exclusivamente lixiviado joven, caracterizado por su fuerte carga orgánica, alta conductividad eléctrica y mayor agresividad química, lo cual representa un escenario exigente para los métodos de contención. Las muestras fueron almacenadas en recipientes plásticos herméticos de 5 litros, y transportadas bajo cadena de frío para preservar sus propiedades fisicoquímicas.

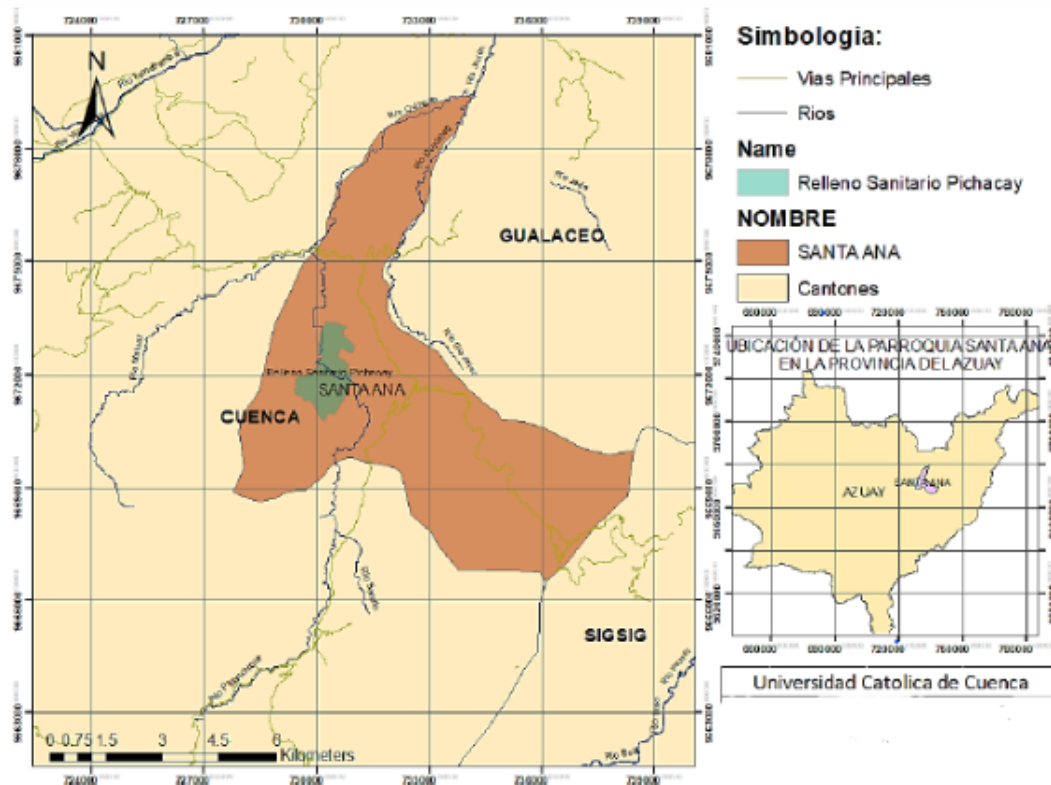
### **3.5.1 Análisis del lixiviado previo al vertido experimental**

Antes de verter los 200 ml de lixiviado en cada uno de los modelos experimentales, se realizó un análisis físico-químico preliminar para conocer las características del lixiviado sin tratamiento. Las muestras fueron recolectadas directamente en el sitio de disposición, utilizando el equipo adecuado y siguiendo los protocolos de bioseguridad correspondientes, debido al alto nivel de toxicidad que puede presentar este tipo de fluido.

Para la recolección se emplearon 2 canecas de almacenamiento, además del uso obligatorio de guantes de protección, mascarilla (para mitigar los efectos de los olores fuertes), botas de caucho y traje de seguridad integral. Estas medidas garantizaron tanto la integridad del investigador como la validez de las muestras transportadas al laboratorio.

### **3.5.2 Zona de estudio**

El muestreo y recolección del lixiviado se realizó en el Complejo de Desarrollo Humano y Ambiental de Pichacay, ubicado en la parroquia Santa Ana, a 21 km de la ciudad de Cuenca. Este complejo ha estado en operación desde el año 1982 y ocupa un área aproximada de 130 hectáreas, consolidándose como una de las infraestructuras más importantes para la gestión de residuos sólidos urbanos en el sur del país.



**Figura 15:** Relleno sanitario Santa Ana

Fuente: Universidad Católica de Cuenca (s.f.)



**Figura 16:** Relleno sanitario de Pichacay

Fuente: EMAC (s.f.)



**Figura 17:** Vista aérea del relleno sanitario de Pichacay

**Fuente:** EMAC (s.f.)



**Figura 18:** Desperdicios en el relleno sanitario de Pichacay

**Fuente:** EMAC (s.f.)

### **3.5.3 Metodología de caracterización**

La caracterización físico-química de las muestras de lixiviado se llevó a cabo utilizando la metodología establecida por Standard Methods, aplicando técnicas como espectrofotometría, sensor respirométrico, gravimetría y multiparamétricos, según el parámetro analizado.

**Tabla 1.** Caracterización físico-química del lixiviado

<b>Parámetro</b>	<b>Técnica</b>	<b>Metodología</b>
<b>DQO</b>	Espectrofotometría	<i>Standard Methods</i> 5220 D
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Respirométrico	<i>Standard Methods</i> 5210 B
<b>Nitratos</b>	Espectrofotometría	<i>Standard Methods</i> 4500- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> B
<b>Amonio</b>	Espectrofotometría	<i>Standard Methods</i> 4500- NH <sub>3</sub>
<b>Color</b>	Espectrofotometría	<i>Standard Methods</i> 4500
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>	Gravimetría	<i>Standard Methods</i> 2540 C
<b>Turbidez</b>	Turbidimetría	<i>Standard Methods</i> 2130 B
<b>pH</b>	Multiparamétrico	<i>Standard Methods</i> 4500-H <sup>+</sup> B
<b>Conductividad</b>	Multiparamétrico	<i>Standard Methods</i> 2510 B
<b>Fósforo Total</b>	Espectrofotometría	<i>Standard Methods</i> 4500-P E

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **3.5.4 Monitoreo semanal y control técnico de los modelos experimentales**

Una vez construidos los modelos experimentales físicos, se procedió a aplicar semanalmente un volumen controlado de 200 ml de lixiviado real en cada uno de ellos. Adicionalmente, pasadas 24 horas de cada aplicación, se colocó una nueva capa de residuos simulados (basura), con el fin de replicar el proceso de disposición progresiva que ocurre en un relleno sanitario real. Esta dinámica se mantuvo constante durante un periodo de diez semanas consecutivas, con el objetivo de simular condiciones sostenidas de operación.

Durante todo el proceso experimental se implementó un monitoreo técnico semanal, documentado mediante fichas técnicas individuales para cada modelo experimental. En cada semana se registraron parámetros clave como el tiempo de escurrimiento, el volumen filtrado y retenido, la presencia de fugas visibles y cualquier cambio visual u olfativo en el lixiviado. En las semanas donde se recolectó suficiente lixiviado en el sistema de captación, se realizaron análisis fisicoquímicos complementarios, incluyendo pH inicial y final, turbidez (NTU), color, así como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ), que permiten evaluar la carga orgánica y la biodegradabilidad del fluido.

Este control periódico y detallado permitió no solo evaluar la eficiencia hidráulica de cada método de impermeabilización, sino también observar su integridad estructural, el comportamiento del sistema frente a residuos acumulados y su desempeño bajo condiciones reales simuladas de operación en un relleno sanitario municipal

Durante la elaboración de los primeros modelos experimentales, se identificaron deficiencias en el proceso constructivo, ya que, aunque el material fue aplicado siguiendo la técnica de colocación capa por capa, no se garantizó un recubrimiento uniforme y continuo en todas las superficies. Esta falta de cobertura generó puntos vulnerables que comprometieron la integridad y el desempeño esperado de los modelos experimentales. A partir de esta observación, en la segunda fase de elaboración se implementó una mejora en el procedimiento, asegurando que cada modelo experimental recibiera un recubrimiento completo y homogéneo, con el fin de optimizar sus propiedades y evitar las fallas detectadas en la primera etapa.

### **3.5.5 Riego de lixiviado en los modelos experimentales**

A continuación, se presentan algunas fotografías que documentan el proceso de riego de lixiviado en los modelos experimentales. Estas imágenes evidencian la aplicación controlada del lixiviado según el procedimiento establecido, permitiendo observar la

distribución del mismo sobre las superficies y su posterior filtración, lo cual forma parte fundamental del análisis experimental realizado.



**Figura 19.** Riego de lixiviado en los modelos experimentales

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.6 Evaluación del desempeño: escurrimiento, retención y fugas**

Una vez aplicada la muestra controlada de lixiviado real en cada modelo físico, se procedió a evaluar su desempeño hidráulico mediante la observación y registro sistemático de variables críticas. Esta fase tuvo como finalidad medir la capacidad de los sistemas impermeabilizantes para contener, retardar o impedir la infiltración del lixiviado a través de las capas constructivas, replicando las condiciones funcionales de un relleno sanitario en operación.

La primera variable registrada fue el tiempo de escurrimiento, medido desde el momento de aplicación del lixiviado hasta el inicio de su recolección en el recipiente inferior.

Este parámetro permitió identificar la velocidad de paso del líquido a través de los materiales, revelando diferencias en la conductividad hidráulica de cada método. Una menor velocidad de escurrimiento fue interpretada como mayor resistencia al flujo y, por tanto, mayor eficacia impermeabilizante.

La segunda variable analizada fue el volumen de lixiviado retenido, determinado a partir de la diferencia entre el volumen aplicado y el volumen recolectado. Este indicador reflejó la capacidad de absorción, adsorción o retención física del sistema, lo cual es especialmente relevante en métodos como la bentonita o la arcilla compactada. Un alto volumen retenido sugiere menor riesgo de filtraciones, siempre que no existan pérdidas invisibles por fuga.

En tercer lugar, se evaluó la presencia de fugas visibles, observando la aparición de gotas, goteo constante o humedades laterales en las paredes de la maqueta. Este tipo de filtraciones representa una falla directa en la integridad del sistema impermeabilizante, por lo que su ocurrencia fue considerada crítica. Se registraron tanto el momento en que apareció la fuga como su ubicación relativa dentro del modelo, para analizar posibles fallos constructivos.

Además, se monitorearon cambios en las características del lixiviado recolectado, incluyendo color, turbidez, olor y residuos suspendidos. Estas variaciones pueden indicar interacción química con el material impermeabilizante, degradación del sistema o procesos de adsorción superficial. Este análisis cualitativo complementó los datos cuantitativos y permitió realizar una lectura más integral del comportamiento de cada método.

### **3.7 Análisis comparativo técnico, normativo y económico**

Finalizada la fase experimental, se llevó a cabo un análisis comparativo integral de los cuatro métodos de impermeabilización, integrando criterios técnicos, normativos y económicos. Este enfoque multidimensional permitió identificar ventajas y limitaciones de cada alternativa, en función de su rendimiento observado y su alineación con las exigencias

operativas y legales. La comparación se estructuró en una matriz evaluativa multicriterio, que facilitó la sistematización de los hallazgos y la toma de decisiones informadas.

Desde el punto de vista técnico, se analizaron indicadores como el tiempo de escurrimiento, el volumen retenido, la presencia de fugas visibles y la estabilidad del sistema durante la prueba. Los métodos fueron clasificados de acuerdo con su capacidad para reducir la permeabilidad, contener el lixiviado y resistir condiciones agresivas. La combinación de arcilla compactada y geomembrana HDPE mostró el mejor desempeño global, seguida por el sistema de HDPE individual, mientras que la bentonita POWERGROUND presentó resultados intermedios y la arcilla simple fue la menos efectiva frente a lixiviado joven.

En el ámbito normativo, se contrastaron los resultados de cada método con los requisitos establecidos en la NTE INEN 2641:2012, que exige barreras con coeficientes de permeabilidad menores o iguales a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, y con los lineamientos del Código Orgánico del Ambiente (COA). Solo el sistema compuesto y la geomembrana HDPE cumplieron plenamente con estas exigencias en términos de capacidad hidráulica y durabilidad. La bentonita POWERGROUND mostró buen desempeño, aunque sin certificación específica como GCL. En cambio, la arcilla compactada, si bien reconocida como método tradicional, no alcanzó el nivel de impermeabilidad requerido en condiciones agresivas sin refuerzos adicionales.

Desde la perspectiva económica, se evaluaron los costos relativos de adquisición, transporte, instalación y mantenimiento para cada sistema. La arcilla compactada fue la opción más accesible en términos de materiales, aunque su instalación requiere maquinaria y control técnico especializado. El HDPE mostró un costo inicial más elevado, justificado por su alta durabilidad y bajo mantenimiento posterior. La bentonita POWERGROUND presentó costos moderados y facilidad logística, mientras que el sistema

compuesto, aunque más costoso, demostró ser el más robusto frente a las exigencias operativas.

### **3.8 Procesamiento de datos y criterios de análisis**

El procesamiento de los datos recolectados durante la fase experimental se realizó mediante un enfoque sistemático, orientado a garantizar la validez y fiabilidad de los resultados. Para ello, se utilizó una plantilla de registro estructurada, en la que se consolidaron las mediciones obtenidas en cada modelo físico bajo condiciones controladas. Esta herramienta facilitó la comparación entre métodos de impermeabilización, permitiendo un análisis cuantitativo y cualitativo simultáneo.

Los datos primarios incluyeron: tiempo de escurrimiento total (en minutos), volumen recolectado (ml), porcentaje de lixiviado retenido, presencia o ausencia de fugas visibles, y cambios en las características organolépticas del fluido. Cada variable fue analizada por separado y luego integrada en una matriz global que permitió identificar patrones de comportamiento y evaluar la eficacia relativa de cada sistema. Para la sistematización y procesamiento se utilizó software de hojas de cálculo, aplicando fórmulas de cálculo básico, medidas de tendencia central y análisis gráfico.

El criterio técnico principal para determinar la eficiencia de cada método fue el coeficiente de retención hidráulica (CRH), calculado como el porcentaje de lixiviado no escurrido respecto al volumen inicial aplicado. Paralelamente, se estableció un índice de desempeño general (IDG) que combinó los resultados técnicos, normativos y económicos mediante asignación de puntajes ponderados, definidos en función de su relevancia práctica. Este índice permitió jerarquizar los métodos con una visión integral y aplicable a la realidad municipal.

En el análisis cualitativo, se interpretaron las observaciones visuales sobre fugas, coloración y comportamiento superficial del lixiviado, lo cual aportó evidencia complementaria sobre la integridad de las barreras y su interacción con el fluido. Las

discrepancias entre métodos fueron discutidas en función de la naturaleza del material impermeabilizante, su reacción ante el contacto con lixiviado y las condiciones de instalación simuladas.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Evaluación general

El relleno sanitario de Pichacay, ubicado en la ciudad de Cuenca, constituye una de las infraestructuras más relevantes para la disposición final de residuos en el sur del Ecuador. Su importancia radica en la recepción de un volumen significativo de desechos sólidos urbanos, lo cual demanda sistemas de control ambiental confiables para prevenir impactos negativos en el suelo y en los recursos hídricos cercanos. En este marco, la investigación planteó como objetivo central evaluar la eficacia de diferentes métodos de impermeabilización, sometiéndolos a ensayos experimentales con lixiviado real proveniente de este sitio, con el propósito de determinar la alternativa más adecuada para su aplicación en contextos municipales similares.

La muestra de lixiviada empleada en los ensayos reflejó condiciones altamente contaminantes, propias de un relleno sanitario con alto grado de degradación orgánica. Los análisis iniciales reportaron una demanda química de oxígeno (DQO) de 8119 mg/L y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 249 mg/L, valores que confirman la presencia de materia orgánica en proceso de descomposición. Asimismo, se registraron concentraciones de sólidos disueltos de 15.600 mg/L, turbidez superior a 800 NTU y color mayor a 500 Pt/Co, parámetros que evidencian la elevada carga física y química del efluente. En cuanto a los nutrientes, se identificaron niveles de nitratos de 15,9 mg/L, fósforo total de 9,072 mg/L y amonio de 0,6798 mg/L, todos ellos indicadores de riesgo potencial para la eutrofización de cuerpos de agua receptores.

La presencia de estos valores tan elevados convierte al lixiviado en un fluido de alta peligrosidad ambiental, donde incluso pequeñas filtraciones desde los modelos experimentales de impermeabilización podrían desencadenar un proceso de contaminación severa en suelos, aguas subterráneas y superficiales. Bajo estas

consideraciones, los ensayos no solo buscaron medir la retención hidráulica de los diferentes materiales, sino también anticipar las consecuencias ambientales en caso de fallas estructurales o defectos constructivos. De esta forma, la evaluación general permitió establecer una base técnica y científica para identificar la importancia de la impermeabilización como barrera crítica en la gestión segura de residuos sólidos urbanos.

## **4.2 Resultados específicos**

### **4.2.1 Identificación y selección de métodos de impermeabilización**

La identificación de los métodos de impermeabilización partió de una revisión técnica, normativa y económica de experiencias aplicadas en rellenos sanitarios de América Latina, con énfasis en el caso ecuatoriano. Este análisis permitió reconocer las alternativas más utilizadas y adaptables a contextos municipales con limitaciones presupuestarias y de infraestructura. Entre los criterios de selección se consideraron el coeficiente de permeabilidad, la resistencia química frente a lixiviados agresivos, la vida útil, la facilidad de instalación, los costos de implementación y mantenimiento, así como el grado de cumplimiento con la normativa ambiental vigente en Ecuador, particularmente la NTE INEN 2641:2012 y las disposiciones del Código Orgánico Ambiental (COA). La vida útil de un sistema de impermeabilización en un relleno sanitario no depende exclusivamente del volumen del relleno ni únicamente del tipo de geomembrana utilizada. Es un parámetro multifactorial que considera: las propiedades físico-químicas de la geomembrana, las condiciones de instalación, el sistema de protección (como geotextil o llantas), la carga ejercida por los residuos, la agresividad de los lixiviados, y el mantenimiento periódico de los ductos y sistemas de monitoreo.

Con base en estos parámetros, se seleccionaron cuatro métodos para su evaluación experimental a través de modelos físicos: arcilla compactada, geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), bentonita sódica PowerGround y un sistema compuesto arcilla + geomembrana. La arcilla compactada fue incluida por su bajo costo y

disponibilidad local, lo que la hace viable en municipios con recursos limitados, pese a sus vulnerabilidades frente a fisuración y desecación. La geomembrana HDPE se incorporó por su uso extendido en rellenos sanitarios técnicos y su alta resistencia química y mecánica, aunque con mayores exigencias en términos de instalación y costos. La bentonita sódica PowerGround fue seleccionada como alternativa a los geosintéticos bentoníticos, por su capacidad de hinchamiento y autosellado, lo que representa una solución innovadora adaptable a condiciones de laboratorio. Finalmente, el sistema compuesto arcilla + geomembrana se consideró por ser una de las configuraciones más seguras y eficientes, al combinar las ventajas de una barrera natural con la de una membrana sintética, como ya se implementa en el propio relleno sanitario de Pichacay.

La selección de estas cuatro alternativas respondió al interés de cubrir tanto soluciones tradicionales como modernas, así como de incluir opciones de bajo costo junto a sistemas de alta tecnología. De este modo, el análisis comparativo posterior entre ellas buscó determinar no solo la eficacia hidráulica y de retención de lixiviados, sino también su aplicabilidad práctica y sostenibilidad en municipios ecuatorianos con condiciones socioeconómicas diversas.

#### **4.2.2 Arcilla Compactada**

El empleo de arcilla compactada con recubrimiento únicamente en la base mostró una retención inicial de 200 ml en cada semana, sin fugas en las primeras seis observaciones. A partir de la semana 7 se detectaron fisuras finas y humedad en el geotextil, aunque aún sin filtración directa. Para las semanas 9 y 10, las fisuras se hicieron más evidentes y se observó filtración puntual, manteniéndose la retención en 200 ml, pero con riesgo creciente de pérdida de integridad.

En el sistema de impermeabilización completa (base y paredes), los volúmenes retenidos se mantuvieron constantes en 200 ml durante las diez semanas, sin registrar filtraciones. Los cambios visuales se limitaron a oscurecimientos leves y humedad

superficial en el geotextil, sin presencia de goteo ni deformaciones notorias. Esta diferencia cuantitativa confirma que la cobertura integral ofreció un desempeño estable frente a la presión de lixiviados.

Los resultados evidencian una marcada diferencia en la resistencia a fugas. En la modalidad parcial, la aparición de fisuras y humedad constante en la segunda mitad del ensayo anticipa un comportamiento deficiente a largo plazo. En contraste, la modalidad cerrada mantuvo un control absoluto, evitando cualquier pérdida de lixiviado y garantizando un almacenamiento seguro del volumen inicial.

En cuanto a parámetros fisicoquímicos, el sistema de recubrimiento en la base permitió la obtención de muestras filtradas con concentraciones relevantes. La demanda química de oxígeno alcanzó 8575 mg/l mg/l en lixiviado puro durante la semana 9, reduciéndose a 2147 mg/l en la semana 10, lo que demuestra un cambio progresivo en la carga orgánica. Asimismo, los sólidos disueltos totales variaron entre 6600 y 7200 mg/l, mientras que la conductividad osciló entre 9,17 y 11,26 mS/cm. Estos valores reflejan la presencia de compuestos altamente contaminantes en los escurrimientos detectados.

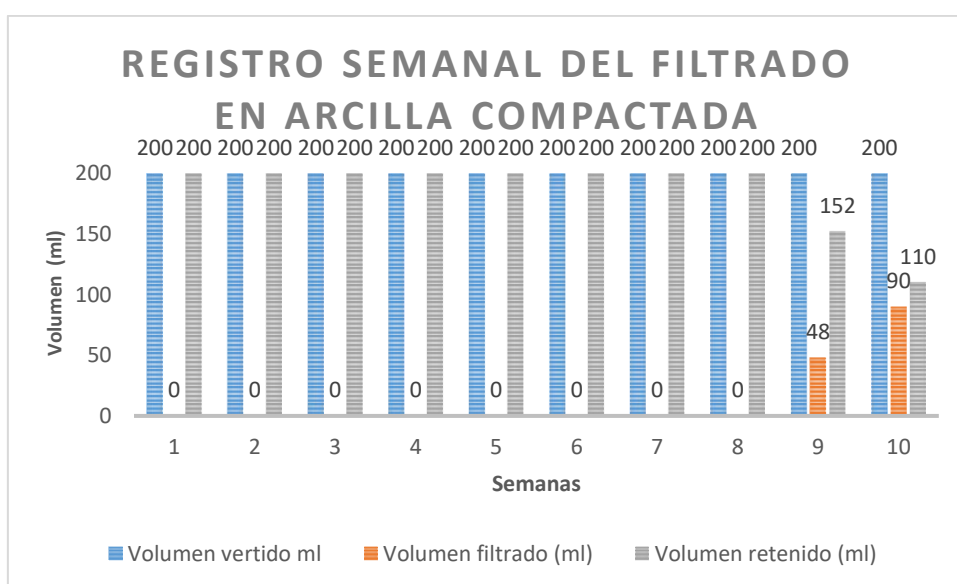


**Figura 20:** DQO en arcilla compactada

**Fuente:** Elaboración propia

La configuración cerrada no generó filtraciones, por lo cual no se registraron datos fisicoquímicos asociados. Esto constituye una prueba empírica de su mayor efectividad, pues la ausencia de lixiviado disponible para análisis indica que el sistema logró una contención completa durante toda la prueba experimental.

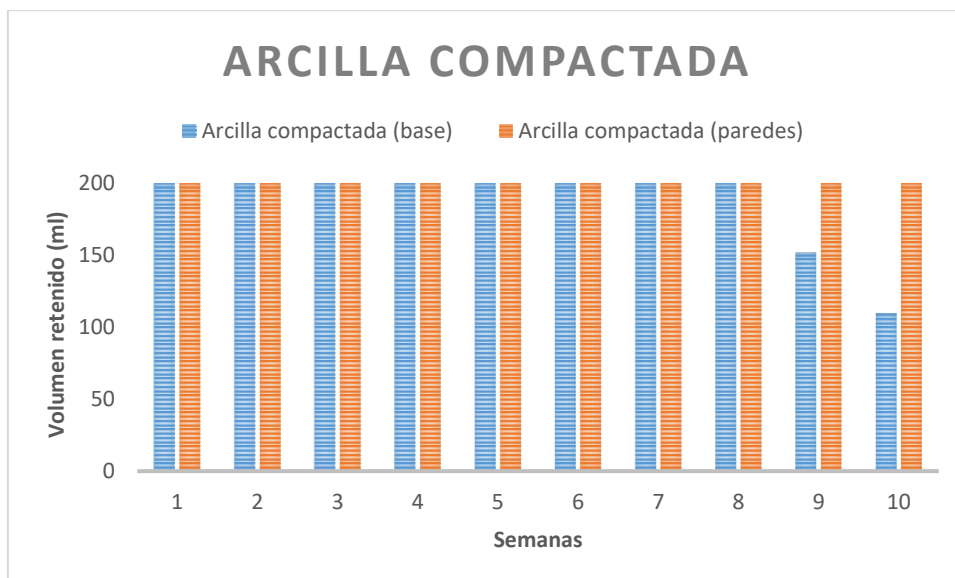
La arcilla compactada presentó un desempeño limitado cuando se empleó solo en la base, con evidencias de debilitamiento a partir de la semana 9 y filtraciones cuantificables en etapas finales como se observa en la figura 21.



**Figura 21:** Registro semanal del filtrado en arcilla compactada

**Fuente:** Elaboración propia

Bajo esto se puede observar en la figura 22, que un recubrimiento completo, el comportamiento fue significativamente superior, manteniendo una retención del 100 % de los volúmenes sin permitir la migración de contaminantes.



**Figura 22:** Comparación de modelos

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.2.3 Sistema Compuesto (Arcilla + Geomembrana)**

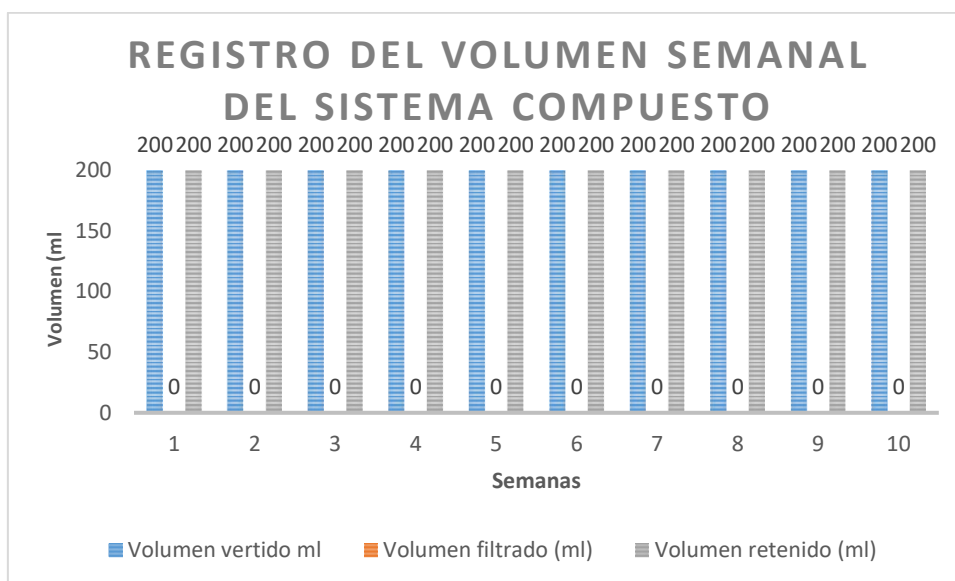
El modelo experimental con arcilla compactada de 5 cm más geomembrana de 1.5 mm en la base retuvo la totalidad de los 200 ml semanales. Durante las diez semanas no se registraron volúmenes filtrados, confirmando un comportamiento impermeable sostenido.

El material de protección superior mostró oscurecimiento progresivo y humedad localizada, aunque sin presencia de fugas visibles. No se documentaron fisuras, hundimientos o desprendimientos de capas, lo que reflejó una interacción efectiva entre la barrera natural y la sintética.

En este primer escenario, la contención fue total. La impermeabilización en la base generó una barrera eficiente, pero el geotextil reveló signos leves de saturación. Estos cambios fueron solo superficiales y no alteraron la capacidad de retención hidráulica.

El segundo modelo experimental, diseñado con arcilla y geomembrana recubriendo tanto base como paredes, presentó un desempeño aún más sólido. En las diez semanas

de prueba mantuvo el 100 % del volumen retenido, sin evidencias de fugas ni filtración lateral.



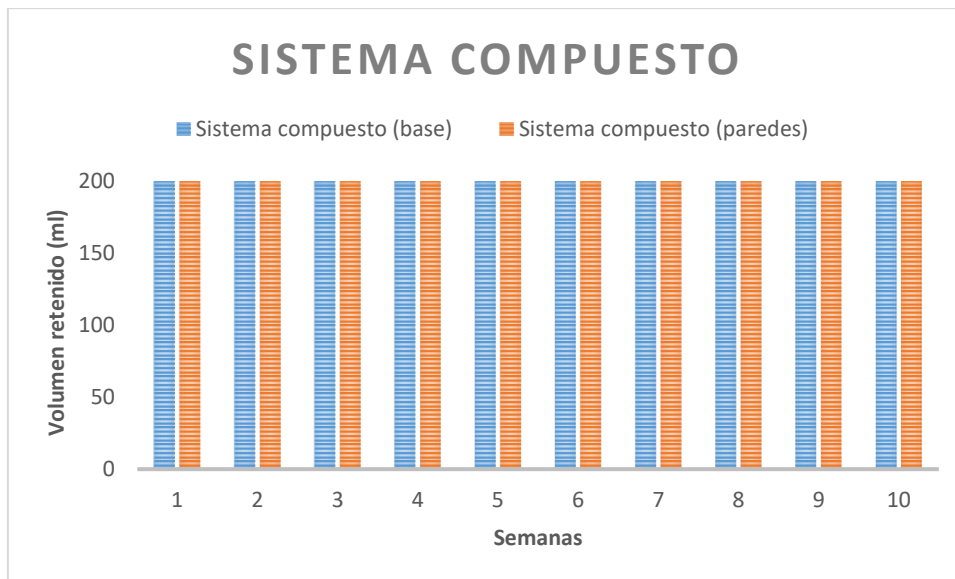
**Figura 23:** Registro del volumen semanal de la arcilla + geomembrana

**Fuente:** Elaboración propia

La condición estructural del sistema completo fue estable. Únicamente se observaron pequeñas ondulaciones y oscurecimientos menores en el recubrimiento, sin deformaciones significativas. El comportamiento visual indicó una alta resistencia frente al contacto continuo con el lixiviado retenido.

Ninguno de los sistemas compuestos generó líquido filtrado, por lo que no se realizaron ensayos fisicoquímicos. La ausencia total de escurrimiento constituye un indicador de máxima efectividad para prevenir la migración de contaminantes en escenarios prolongados.

Comparando ambas configuraciones como se demuestra en la figura 24, la impermeabilización únicamente en la base demostró una eficacia sobresaliente. Sin embargo, la aplicación integral en base y paredes incrementó la seguridad estructural, reduciendo riesgos de filtración lateral y consolidando la propuesta más robusta dentro de los ensayos realizados.



**Figura 24:** Comparación de modelos

**Fuente:** Elaboración propia

El método compuesto de arcilla y geomembrana garantizó estanqueidad absoluta en sus dos versiones. La alternativa con recubrimiento completo ofreció mayor estabilidad visual y mecánica, siendo la opción más recomendable como solución duradera para sistemas de contención.

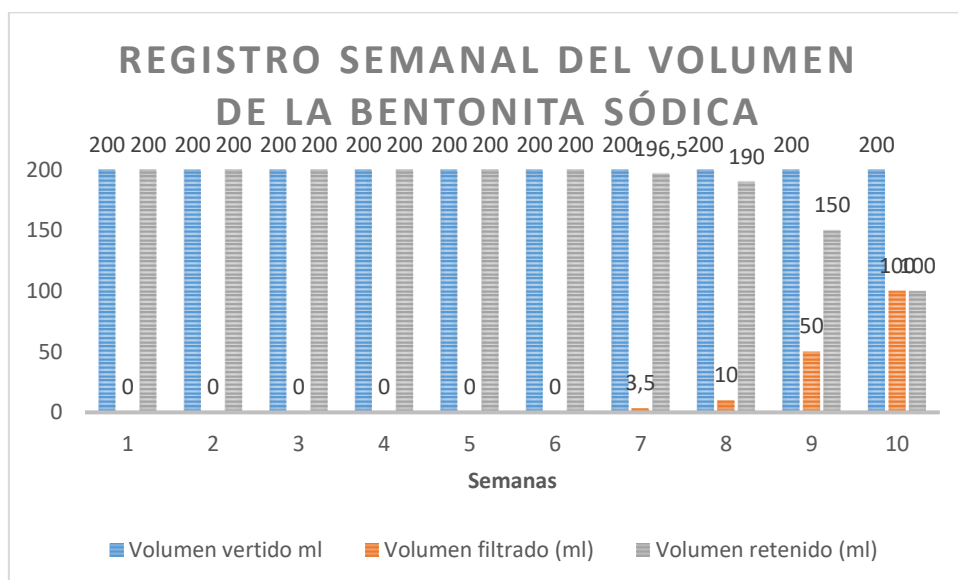
#### 4.2.4 Bentonita Sódica

El modelo experimental con recubrimiento únicamente en la base mantuvo un desempeño estable durante las diez semanas. No se registraron volúmenes filtrados en ninguno de los ensayos, lo que evidenció la eficacia inicial de la bentonita como barrera autosellante.

El material presentó hinchamiento progresivo, formación de gel y sellado automático de poros. Estos cambios mejoraron la estanqueidad, aunque también generaron hundimientos leves y asentamientos localizados en la superficie expuesta, derivados del peso acumulado y la absorción de humedad.

En este escenario, la bentonita funcionó como un sistema de retención confiable. Sin embargo, su comportamiento mecánico señaló la necesidad de monitoreo en campo para evitar deformaciones que, a largo plazo, pudieran evolucionar en puntos de debilidad estructural.

El segundo modelo experimental, diseñado con impermeabilización completa en base y paredes, mostró un patrón distinto. Hasta la semana seis se mantuvo la retención total, pero en la séptima apareció el primer filtrado de 3.5 ml, lo que marcó un cambio crítico en el desempeño.



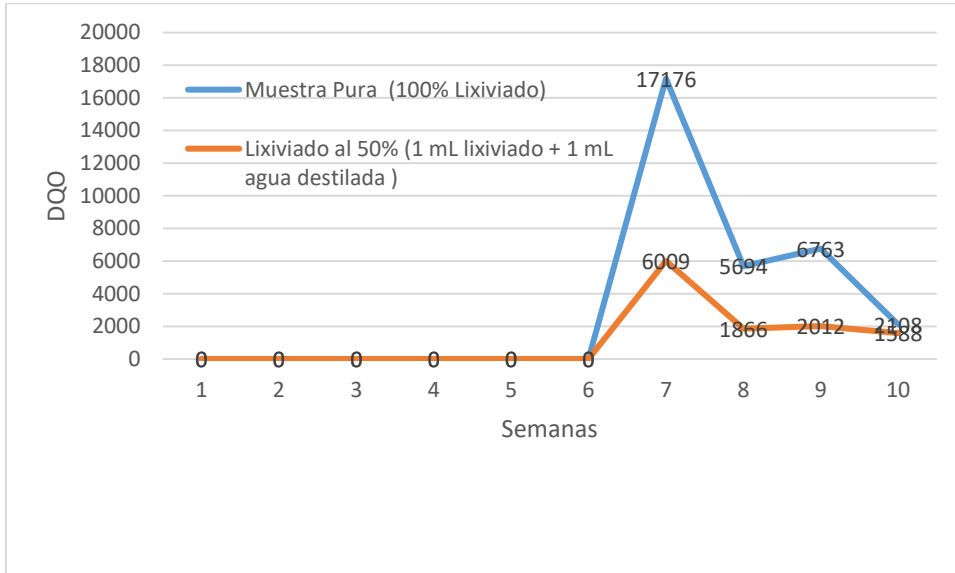
**Figura 25:** Registro semanal del volumen de la Bentonita Sódica

**Fuente:** Elaboración propia

El volumen filtrado aumentó de forma progresiva como se observó en la figura 25, alcanzando 10 ml en la semana ocho, 50 ml en la novena y hasta 100 ml en la décima. La pérdida de contención coincidió con la aparición de fisuras finas en solapes y hundimientos en bordes.

El lixiviado recuperado reveló características significativas. La demanda química de oxígeno (DQO), inicio con 17176 mg/L y a la semana 10 ya arrojo resultados de 2108 mg/L, la turbidez superó los 776 NTU, y los sólidos disueltos que entre la semana ocho que se

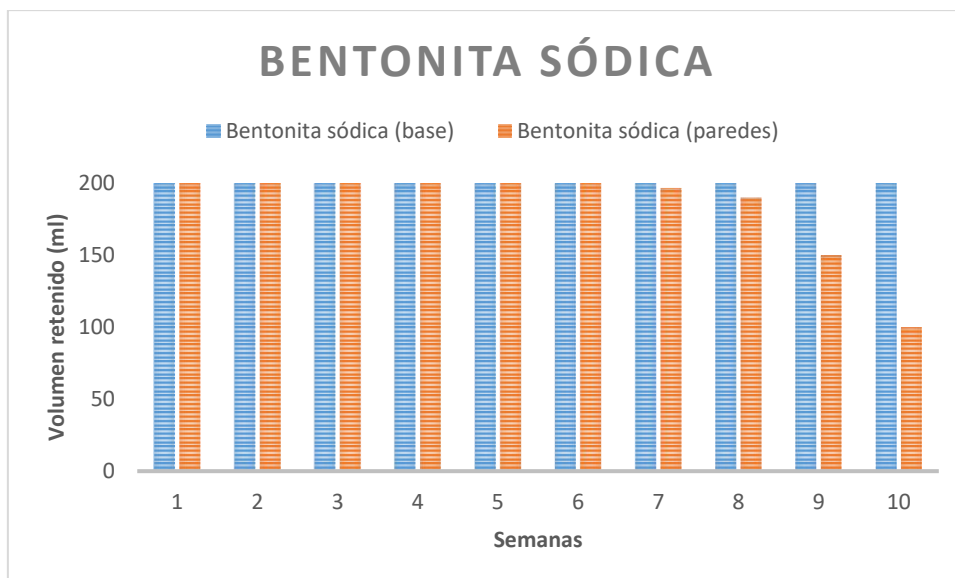
recolecto suficiente muestra para hacer el ensayo variaron de 9000 mg/L, la semana 9 obtuvo 2000 mg/L y la semana 10 arrojó datos como 11320 mg/L. También se detectaron nitratos y fósforo total en concentraciones medibles.



**Figura 26:** DQO de la bentonita sódica

**Fuente:** Elaboración propia

Estos resultados indicaron que, pese a la buena capacidad inicial, el sistema cerrado con bentonita fue vulnerable en zonas críticas. Los solapes, las juntas y los bordes resultaron determinantes en la pérdida de estanqueidad, comprometiendo la fiabilidad del recubrimiento total.



**Figura 27:** Comparación de modelos

**Fuente:** Elaboración propia

La comparación de ambas configuraciones mostró un contraste evidente como se indica en la imagen 27. Mientras la aplicación únicamente en la base garantizó retención absoluta durante el periodo de análisis, la cobertura completa reveló limitaciones asociadas a la instalación y la estabilidad mecánica del material.

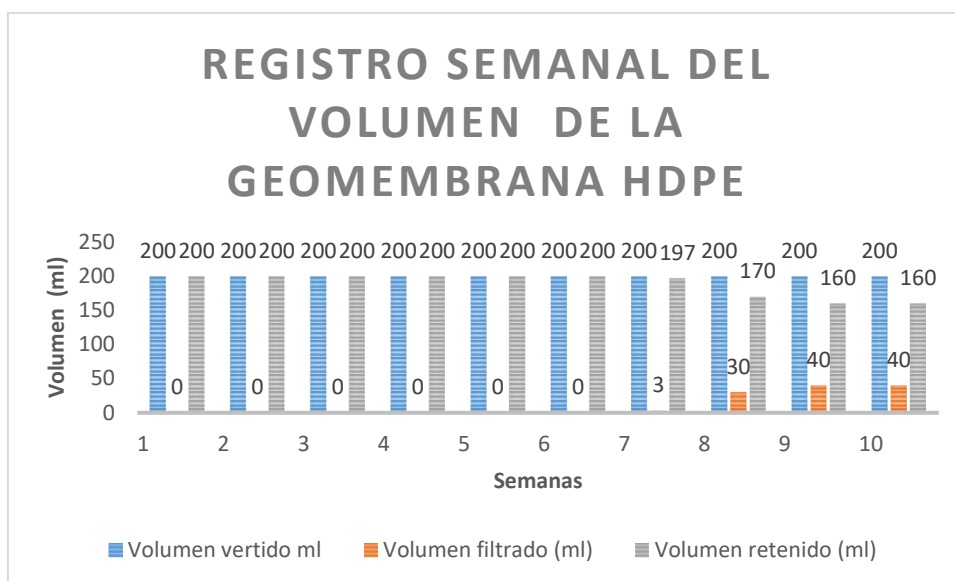
La bentonita sódica, probó ser altamente eficiente como capa autosellante en configuraciones parciales. No obstante, al aplicarse en sistemas cerrados, requiere una instalación minuciosa y un control estricto para evitar fallos por fisuras o asentamientos.

#### **4.2.5 Geomembrana HDPE**

El modelo experimental configurado únicamente con recubrimiento en la base evidenció un desempeño satisfactorio en la primera etapa del ensayo. Durante seis semanas consecutivas no se detectaron volúmenes filtrados, lo que confirmó la efectividad inicial de la geomembrana como barrera hidráulica.

A partir de la semana siete surgieron las primeras pérdidas, con un filtrado de 3 ml que se incrementó progresivamente en los periodos siguientes. En la semana ocho se

alcanzaron 30 ml y, en las semanas nueve y diez, el volumen llegó a 40 ml, indicando un deterioro acelerado.



**Figura 28:** Registro semanal del volumen de la geomembrana HDPE

**Fuente:** Elaboración propia

Las observaciones visuales mostraron fisuras en uniones y esquinas, hundimientos en zonas centrales y signos de degradación en áreas sometidas a mayor presión. Estos defectos coincidieron con el aumento de la filtración y reflejaron vulnerabilidades estructurales en los puntos de solape.

El lixiviado filtrado presentó concentraciones elevadas de contaminante, como la demanda química de oxígeno que se puede observar en las tablas 2 y 3, la turbidez superó los 800 NTU, y el fósforo total alcanzó hasta 8.5 mg/L. Estos valores demostraron que el fallo en la contención implicó la liberación de una carga significativa de compuestos.

**Tabla 2:** DQO muestra pura

<b>Semanas</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
7	12725	mg/l
8	5548	mg/l
9	4984	mg/l
10	4937	mg/l

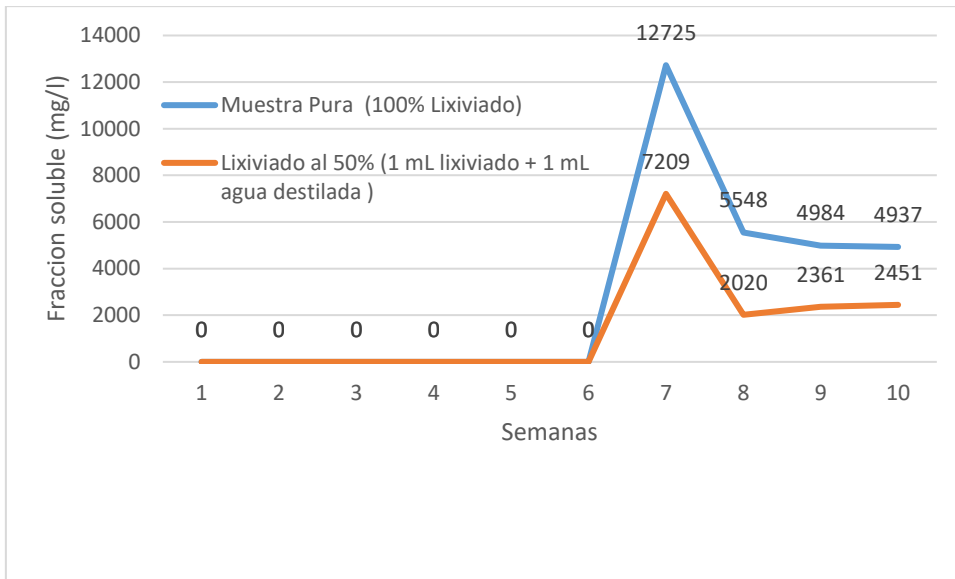
**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 3.** DQO Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)

<b>Semanas</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
7	7209	mg/l
8	2020	mg/l
9	2361	mg/l
10	2461	mg/l

**Fuente:** Elaboración propia

Estos valores demostraron que el fallo en la contención implicó la liberación de una carga significativa de compuestos.

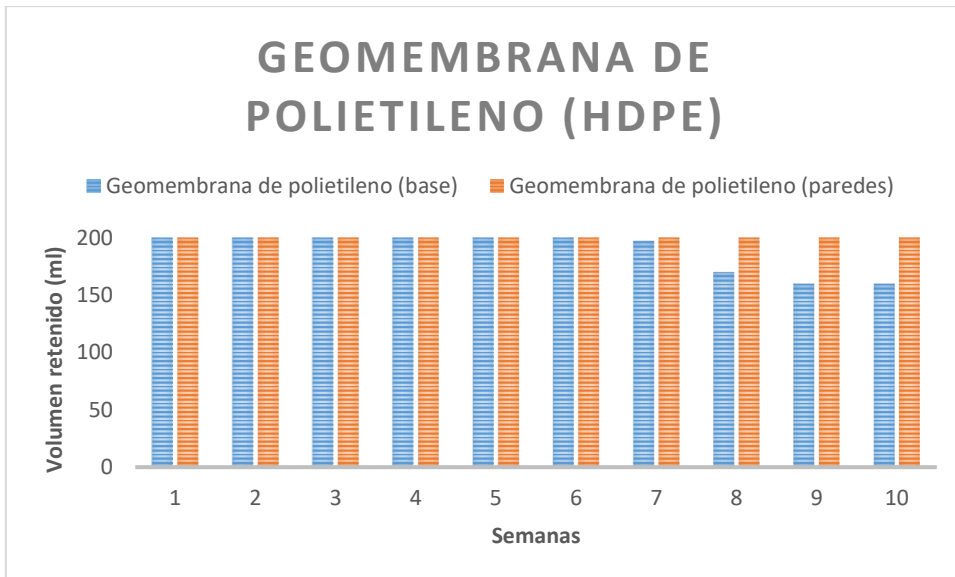


**Figura 29:** DQO geomembrana HDPE

**Fuente:** Elaboración propia

En contraste, el modelo experimental con impermeabilización completa —que incorporó la geomembrana tanto en la base como en las paredes— mantuvo un desempeño impecable durante las diez semanas de evaluación. No se registraron volúmenes filtrados en ningún periodo, garantizando una retención absoluta del lixiviado.

Las inspecciones periódicas confirmaron un geotextil seco, sin fisuras ni deformaciones en la superficie. La estabilidad del sistema cerrado evidenció que la cobertura integral eliminó los puntos críticos presentes en las configuraciones parciales.



**Figura 30:** Comparación de modelo.

**Fuente:** Elaboración propia.

La comparación de ambos modelos experimentales resaltó el rol decisivo de la instalación lateral. Mientras la cobertura parcial mostró fallos en las uniones que derivaron en filtraciones cuantificables, el sistema con recubrimiento completo proporcionó una contención robusta y confiable.

La geomembrana de HDPE de 1.5 mm demostró un potencial elevado como barrera de impermeabilización. Sin embargo, su eficacia depende en gran medida de una instalación adecuada y de la extensión total de la cobertura para garantizar un desempeño duradero.

### 4.3 Comparativa entre métodos

#### 4.3.1 Comparación técnica

El análisis técnico de los métodos evaluados evidencia diferencias claras en cuanto a capacidad de retención, estabilidad mecánica y susceptibilidad a fisuras. La arcilla compactada mostró un desempeño aceptable únicamente bajo la configuración completa,

logrando retención total del lixiviado, mientras que en la modalidad base se observaron filtraciones progresivas y debilitamiento estructural con hundimientos y fisuras.

El sistema compuesto arcilla + geomembrana presentó el comportamiento más robusto, tanto en la configuración base como en la completa. La ausencia de fugas, junto con la estabilidad de las capas y la mínima presencia de alteraciones visuales, reflejó la sinergia de combinar materiales minerales y sintéticos. Este resultado confirma su superioridad técnica frente a soluciones individuales.

La bentonita sódica evidenció un buen desempeño en la modalidad base debido a su capacidad autosellante; sin embargo, en la configuración completa aparecieron fisuras en solapes y bordes que dieron lugar a filtraciones desde la séptima semana. Este comportamiento indica que su eficacia depende de un control minucioso durante la instalación y del manejo de cargas mecánicas.

Finalmente, la geomembrana de HDPE ofreció un excelente desempeño bajo impermeabilización completa, sin registrar filtraciones y con un estado físico estable. No obstante, en la modalidad base presentó vulnerabilidad en uniones y esquinas, lo que derivó en fugas a partir de la séptima semana. Este hallazgo resalta la importancia de un adecuado sellado lateral y de la protección de puntos críticos en su implementación.

Los resultados técnicos demuestran que los sistemas con cobertura completa garantizan un mayor nivel de seguridad hidráulica, siendo el compuesto arcilla + geomembrana y la geomembrana completa los más confiables. En contraste, los métodos base evidencian riesgos importantes de fisuración y pérdida de estanqueidad, comprometiendo su utilidad en contextos de alta exigencia ambiental.

#### **4.3.2 Comparación normativa**

La evaluación normativa se centró en el grado de cumplimiento de los métodos de impermeabilización respecto a la NTE INEN 2641:2012, que regula el diseño y construcción

de rellenos sanitarios en Ecuador, y al Código Orgánico del Ambiente (COA), que establece lineamientos generales para la prevención y control de la contaminación.

La arcilla compactada, en su configuración completa, alcanzó los criterios de la INEN en términos de permeabilidad ( $\leq 10^{-7}$  cm/s). Sin embargo, las filtraciones registradas en la modalidad base evidencian que, por sí sola y sin cobertura lateral, no garantiza la seguridad ambiental exigida. En consecuencia, su aplicación requiere estricta supervisión de compactación y control de humedad para ajustarse al marco normativo.

El sistema compuesto arcilla + geomembrana superó ampliamente los estándares de la norma nacional, al ofrecer redundancia de barreras y máxima estanqueidad. Su desempeño, tanto en modalidad base como completa, coincide con las mejores prácticas internacionales y responde directamente a los requerimientos del COA sobre sistemas de doble protección para residuos de alto impacto ambiental.

La bentonita sódica aunque mostró capacidad autosellante en condiciones de laboratorio, presentó fallas en la configuración completa debido a solapes defectuosos. Este comportamiento implica un riesgo frente a la normativa, ya que la INEN exige estabilidad hidráulica sostenida en el tiempo. Así, su uso podría ser aceptado únicamente como complemento o respaldo de otro sistema principal, más que como barrera primaria.

Por su parte, la geomembrana de HDPE cumplió de manera plena con la normativa en la modalidad completa, garantizando impermeabilidad y resistencia química ante el lixiviado. No obstante, en la modalidad base se registraron filtraciones en uniones y esquinas, lo que contraviene los criterios de seguridad establecidos en el COA, especialmente en lo referente a la protección de aguas subterráneas.

Desde la perspectiva normativa, los sistemas que logran un cumplimiento más robusto son la geomembrana de HDPE completa y el sistema compuesto arcilla + geomembrana, ya que aseguran el nivel de impermeabilización requerido por la legislación ecuatoriana y estándares internacionales.

### 4.3.3 Comparación económica

El análisis económico de los métodos evaluados consideró aspectos vinculados a costos de instalación, mantenimiento y requerimientos de operación. En este sentido, se evidencian diferencias sustanciales que condicionan la aplicabilidad de cada alternativa en contextos municipales con recursos limitados.

La arcilla compactada es el método más económico en términos de materiales y disponibilidad local, lo que la convierte en una opción viable para municipios con restricciones presupuestarias. Sin embargo, su desventaja radica en los costos asociados al mantenimiento, ya que requiere control periódico de humedad, compactación adecuada y rehabilitación en caso de fisuras o hundimientos, lo que puede elevar los gastos a mediano plazo.

El sistema compuesto (arcilla + geomembrana) implica una inversión inicial considerablemente mayor, debido a la adquisición de geomembrana de HDPE y al incremento en las labores de instalación. No obstante, sus beneficios en durabilidad, estabilidad hidráulica y reducción de riesgos de filtración compensan los costos, ya que minimiza la necesidad de reparaciones futuras y alarga la vida útil de la infraestructura.

La bentonita sódica presenta un costo intermedio. Su transporte e instalación son relativamente accesibles, pero su eficiencia depende de la protección de solapes y bordes. En escenarios de fallas constructivas, el gasto en reparaciones puede superar el ahorro inicial, reduciendo su competitividad económica frente a otras alternativas más estables.

Por su parte, la geomembrana de HDPE completa se ubica entre las soluciones de mayor costo inicial, dado que requiere personal especializado, equipos de soldadura y pruebas de control de calidad. Sin embargo, su bajo requerimiento de mantenimiento y alta durabilidad justifican la inversión, especialmente en rellenos de gran escala. En contraste, la modalidad base-only, aunque más barata, resulta económicamente ineficiente debido a los costos derivados de fugas y reparaciones, además de incumplir con la normativa.

En términos comparativos, la opción más costo-efectiva a largo plazo es el sistema compuesto arcilla + geomembrana, seguido de la geomembrana HDPE completa. Ambos ofrecen un balance entre inversión inicial y reducción de riesgos futuros. La arcilla compactada completa puede ser adecuada en municipios de bajos recursos, aunque requiere acompañamiento técnico constante, mientras que la bentonita debería reservarse como capa complementaria y no como solución primaria.

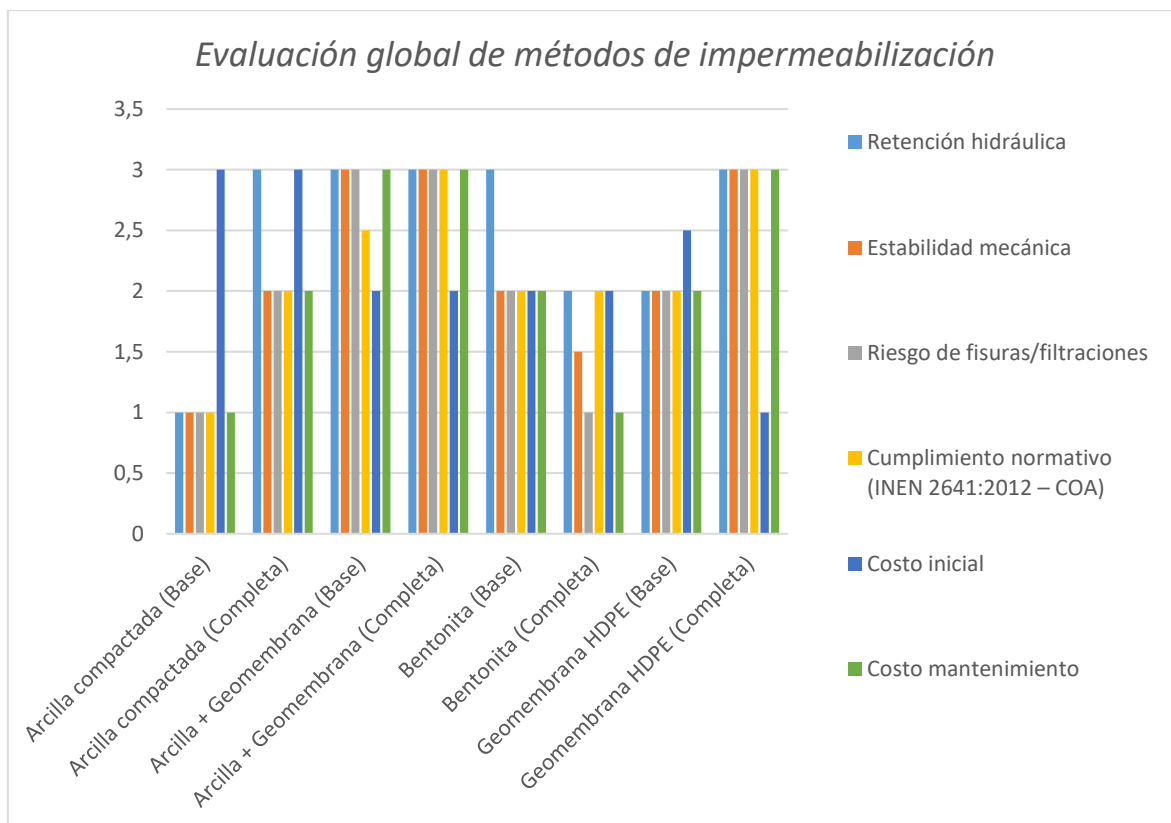
#### **4.3.4 Análisis Global**

La evaluación conjunta de los cuatro métodos permitió identificar diferencias claras en su capacidad de contención. Los sistemas con cobertura parcial en la base mostraron un comportamiento inicial aceptable, pero tendieron a fallar con el paso de las semanas. En contraste, las configuraciones cerradas mantuvieron un mejor desempeño a largo plazo

**Tabla 4.** Matriz de evaluación global de métodos de impermeabilización

Método / Configuración	Retención hidráulica	Estabilidad mecánica	Riesgo de fisuras/filtraciones	Cumplimiento normativo (INEN 2641:2012 – COA)	Costo inicial	Costo mantenimiento	Evaluación global
Arcilla compactada (Base)	Baja (1)	Baja (1)	Alto (1)	Bajo (1)	Bajo (3)	Alto (1)	Limitada
Arcilla compactada (Completa)	Alta (3)	Media (2)	Medio-Bajo (2)	Medio (2)	Bajo (3)	Medio (2)	Aceptable
Método Compuesto (Base)	Alta (3)	Alta (3)	Bajo (3)	Medio-Alto (2–3)	Medio (2)	Bajo (3)	Muy favorable
Método Compuesto (Completa)	Alta (3)	Alta (3)	Muy bajo (3)	Alto (3)	Medio-Alto (2)	Bajo (3)	Óptima
Bentonita (Base)	Alta (3)	Media (2)	Medio (2)	Medio (2)	Medio (2)	Medio (2)	Aceptable
Bentonita (Completa)	Media (2)	Media-Baja (1–2)	Alto (1)	Medio (2)	Medio (2)	Alto (1)	Limitada
Geomembrana HDPE (Base)	Media (2)	Media (2)	Medio-Alto (1–2)	Medio (2)	Medio-Alto (2)	Medio (2)	Aceptable
Geomembrana HDPE (Completa)	Alta (3)	Alta (3)	Muy bajo (3)	Alto (3)	Alto (1)	Bajo (3)	Óptima

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 31:** Evaluación global de métodos de impermeabilización

**Fuente:** Elaboración propia.

El método de arcilla compactada con cobertura solo en la base resistió sin filtraciones durante las diez semanas, demostrando una barrera inicial efectiva. Sin embargo, presentó oscurecimientos y ondulaciones visibles, lo que anticipa vulnerabilidades frente a esfuerzos prolongados. En la variante cerrada, la retención fue igualmente completa, pero con menor deformación superficial, confirmando su mayor estabilidad estructural.

El sistema compuesto de arcilla y geomembrana evidenció un comportamiento notable en ambas configuraciones. La versión con recubrimiento en la base retuvo el lixiviado sin pérdidas cuantificables, mientras que la configuración integral mostró la misma capacidad. Ambos modelos experimentales carecieron de filtrados y no fue necesario realizar ensayos fisicoquímicos, lo que confirmó la eficiencia de la combinación natural-sintética.

La bentonita sódica mostró una respuesta diferenciada entre las configuraciones. En la cobertura parcial no se registraron pérdidas, aunque se observaron fenómenos de hinchamiento y autosellado que implican ajustes volumétricos. En la impermeabilización completa, las primeras filtraciones aparecieron en la semana siete con 3 ml y alcanzaron 100 ml en la semana diez. Los valores de DQO oscilaron entre 2 y 17 g/L, la turbidez superó los 776 NTU y los sólidos disueltos variaron entre 1 y 11 g/L. Estos datos confirmaron que fisuras y solapes son puntos críticos que comprometen la contención.

La geomembrana de HDPE con cobertura parcial presentó pérdidas crecientes a partir de la semana siete, con volúmenes entre 3 y 40 ml. El lixiviado filtrado registró DQO de 4.9 a 12.7 g/L, fósforo total de hasta 8.5 mg/L y turbidez mayor a 800 NTU. En cambio, la configuración cerrada mostró retención absoluta durante las diez semanas, con geotextil seco y estable, evidenciando que la cobertura integral elimina los puntos débiles de unión.

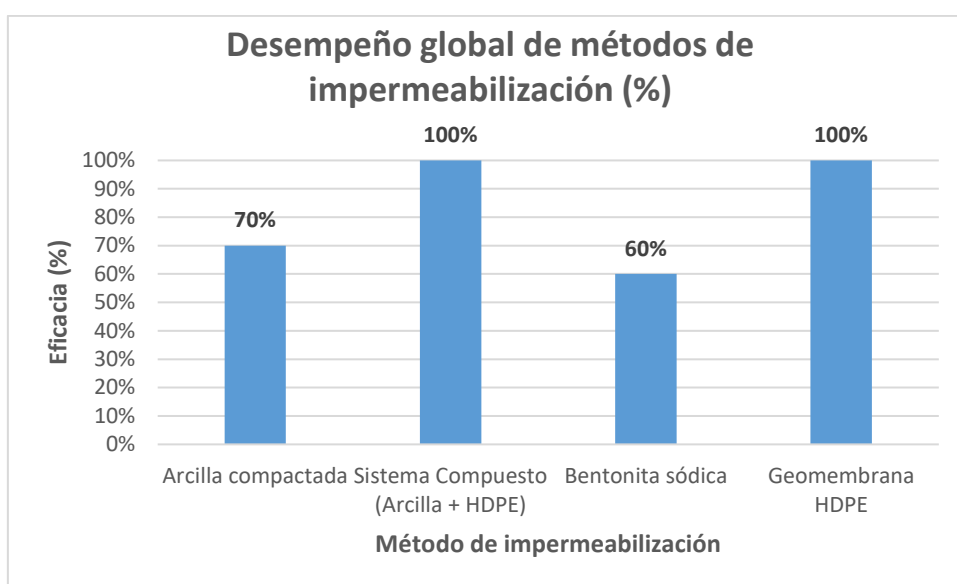
El análisis de los resultados revela patrones comunes. Los sistemas de cobertura parcial tienden a fallar por bordes, solapes o uniones, lo que genera filtraciones progresivas. Por el contrario, las configuraciones completas aseguran una retención más robusta y un desempeño estable en el tiempo.

En términos comparativos, la bentonita y la geomembrana en base mostraron vulnerabilidades crecientes con el tiempo, mientras que la arcilla compactada y el sistema mixto arcilla + geomembrana ofrecieron mayor estabilidad. Sin embargo, en cobertura integral, los modelos experimentales de HDPE y arcilla + geomembrana resultaron los más confiables, con cero filtraciones y mínima alteración visual.

Como reflexión técnica, cada material presenta ventajas y limitaciones. La arcilla compactada es económica y funcional, pero susceptible a deformaciones. La bentonita posee capacidad de autosellado, aunque es sensible a asentamientos y fisuras. La geomembrana HDPE asegura máxima estanqueidad, pero depende de la correcta

instalación en un sistema cerrado. El compuesto arcilla + geomembrana equilibra costos, durabilidad y confiabilidad, convirtiéndose en una opción técnica altamente recomendable.

La impermeabilización completa siempre supera a la cobertura parcial. Los parámetros cuantitativos confirman que las filtraciones generan incrementos de DQO, turbidez y nutrientes en los lixiviados, comprometiendo la protección ambiental. La decisión sobre el método más adecuado debe equilibrar costos, facilidad constructiva y confiabilidad hidráulica a largo plazo.



**Figura 32:** Desempeño de los métodos de impermeabilización

**Fuente:** Elaboración propia

Al comparar los cuatro métodos, se identificó que la impermeabilización completa con geomembrana HDPE y el sistema compuesto arcilla + geomembrana ofrecieron el desempeño más confiable. Ambos modelos experimentales mantuvieron una retención del 100% durante las diez semanas, sin filtraciones ni alteraciones significativas en los materiales.

En el caso de la geomembrana HDPE en configuración cerrada, los resultados demostraron ausencia total de lixiviados, con geotextil seco y superficie estable. Esta

condición evidencia un comportamiento hidráulico robusto, capaz de enfrentar la presión constante del vertido sin degradaciones visibles.

Por su parte, el sistema combinado (arcilla + geomembrana) mostró la misma efectividad, pero con una ventaja adicional: el respaldo natural de la arcilla que funciona como segunda barrera frente a posibles fallas en la lámina sintética. Este doble mecanismo de protección aumenta la seguridad del confinamiento y reduce riesgos de impacto ambiental.

Considerando la realidad de Pichacay, donde la disposición de residuos sólidos implica altos volúmenes de lixiviados con potencial de infiltración, el sistema compuesto arcilla + geomembrana en configuración completa se sugiere como la alternativa más adecuada. Esta opción equilibra la robustez hidráulica, la capacidad de redundancia en el sellado y la viabilidad técnica en campo, garantizando un control eficiente y sostenible a largo plazo.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

La investigación permitió evaluar experimentalmente cuatro métodos de impermeabilización (arcilla compactada, sistema compuesto arcilla + geomembrana, bentonita sódica y geomembrana HDPE) en configuraciones de base y completa, empleando lixiviado real de Pichacay. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en la capacidad de retención: mientras los sistemas completos de HDPE y arcilla + geomembrana mantuvieron una eficiencia del 100% durante diez semanas, otras alternativas presentaron filtraciones desde la semana 7 con volúmenes de hasta 100 ml. Con base en estas evidencias, se identificó el sistema compuesto arcilla + geomembrana en configuración cerrada como el método más recomendable para contextos similares, garantizando redundancia en la protección y control seguro de lixiviados.

El análisis técnico y documental permitió identificar cuatro alternativas viables de impermeabilización, considerando criterios normativos y económicos. La arcilla compactada, la bentonita sódica, la geomembrana HDPE y el sistema compuesto arcilla + geomembrana fueron seleccionados por su aplicabilidad comprobada en rellenos sanitarios regionales y su disponibilidad en el mercado. Este proceso confirmó que las opciones deben evaluarse no solo por su costo inicial, sino también por su durabilidad, facilidad de instalación y capacidad de control hidráulico en el tiempo.

La evaluación experimental mostró contrastes claros en el desempeño hidráulico y físico-químico. Los sistemas completos de HDPE y arcilla + geomembrana retuvieron la totalidad del lixiviado sin filtraciones. En cambio, la bentonita en configuración completa presentó pérdidas desde la semana 7, acumulando hasta 100 ml en la semana 10 con DQO entre 2–17 g/L y turbidez >776 NTU. La geomembrana en base únicamente también evidenció fugas progresivas, alcanzando 40 ml filtrados con fósforo total de hasta 8.5 mg/L.

Estos resultados evidencian que el diseño constructivo y la cobertura lateral son factores determinantes en la eficacia de cada método.

La comparación global integró criterios técnicos, ambientales y económicos. Se determinó que la geomembrana HDPE en configuración cerrada ofrece un desempeño sobresaliente, pero depende fuertemente de la correcta instalación. En contraste, el sistema compuesto arcilla + geomembrana combina la seguridad de la lámina sintética con la capacidad de autosello de la barrera natural, ofreciendo una doble línea de protección frente a fallas puntuales. Por ello, este método se propone como la solución más adecuada para municipios con condiciones similares a Pichacay, al equilibrar efectividad técnica, factibilidad económica y cumplimiento normativo.

## **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda implementar sistemas compuestos de arcilla + geomembrana en configuración completa para rellenos sanitarios en condiciones similares a Pichacay, priorizando su diseño redundante que asegura control total de lixiviados y minimiza riesgos ambientales a largo plazo.

Es aconsejable que los municipios realicen una evaluación previa de opciones de impermeabilización considerando no solo los costos iniciales, sino también la vida útil, los requisitos de mantenimiento y la disponibilidad local de materiales, a fin de garantizar soluciones sostenibles y funcionales.

Se sugiere que durante la construcción de sistemas de impermeabilización se asegure la correcta instalación, con especial atención en uniones, solapes y recubrimientos laterales, ya que estos puntos fueron identificados como críticos para prevenir filtraciones y asegurar la retención completa del lixiviado.

Es recomendable que, al seleccionar el método final de impermeabilización, se priorice el sistema compuesto arcilla + geomembrana como alternativa más robusta,

combinando seguridad técnica con viabilidad económica, especialmente en municipios con limitaciones presupuestarias y alta vulnerabilidad ambiental.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, G. (2020). *SISTEMA DE PRE-TRATAMIENTO Y RECIRCULACIÓN DE LOS LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DE JIPIJAPA*.  
<http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2404>
- Bolaños, I., Ortega, K., & Polanco, V. (2009). *USO DE GEOTEXTILES EN DISEÑOS DE CARRETERAS*.
- Caiza, D., Chimbo, A., Bárbara Sarduy-Pereira, L., Pisco, W. E., Diéguez-Santana, K., Bárbara, L., Pereira, S., & Diéguez, K. (2018). *Propuesta de producción más limpia en el proceso de elaboración de abonos orgánicos con desechos del camal, realizado en el relleno sanitario del cantón baños de agua santa, provincia de tungurahua*.  
[http://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD\\_IKIAM/113](http://repositorio.ikiam.edu.ec/jspui/handle/RD_IKIAM/113)
- Carbonel, D. (2024). Characterization of leachates and analysis of the contamination potential index in two Peruvian landfills. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 40, 677–697.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.55105>
- Cayetano Miranda, W. (2024). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario sobre la salud de los pobladores de la comunidad de Itapalluni - Puno 2023. *Universidad Privada San Carlos*. <http://repositorio.upsc.edu.pe:8080/handle/UPSC/725>
- Cervantes, J. M. (2021). *Evaluación del sitio de disposición final de residuos sólidos en Martínez de la Torre, Veracruz*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4602>
- Chen, C., Zhan, L. T., Xie, H. J., & Chen, Y. M. (2025). Bayesian updating for improving long-term performance prediction of composite liners in landfills with temporally variable leachate head. *Computers and Geotechnics*, 187, 107511.  
<https://doi.org/10.1016/J.COMPGeo.2025.107511>
- CIFUENTES, A. D. (2013). *Estudio del sistema de tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario de Lago Agrio*.

[https://www.academia.edu/116109670/Estudio\\_del\\_sistema\\_de\\_tratamiento\\_de\\_lixiviados\\_en\\_el\\_relleno\\_sanitario\\_de\\_Lago\\_Agrio](https://www.academia.edu/116109670/Estudio_del_sistema_de_tratamiento_de_lixiviados_en_el_relleno_sanitario_de_Lago_Agrio)

Correal, M., Faleiro, C., Piamonte, C., Rihm, A., & Zambrano, M. (2023). *Sostenibilidad financiera de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. <https://doi.org/10.18235/0004797>

Daniel, D. E. . (1997). *Geotechnical practice for waste disposal*. <https://www.barnesandnoble.com/w/geotechnical-practice-for-waste-disposal-de-daniel/1101310372>

David, L., & Fabara, L. (2011). *Diagnóstico caracterización y propuesta de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Ambato*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3952>

Flores Jiménez, M. J., & Ruiz Albiño, A. S. (2025). “*Estudio de un sistema de generación de energía eléctrica a través de biogás obtenido del relleno sanitario del cantón Latacunga*.” <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/14426>

Florestano, J. (2024). *EVALUACIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO DE INFRAESTRUCTURAS UBICADAS EN CAMPOS DUNARES CHILENOS: CASO DE ESTUDIO EDIFICIO KANDINSKY, CAMPO DUNAR DE CONCÓN, CHILE*.

INEN. (2012). *Norma Técnica Ecuatoriana Nte Inen 2641:2012* . <https://es.scribd.com/document/498358554/2641>

Jo, H. Y., Katsumi, T., Benson, C. H., & Edil, T. B. (2001). Hydraulic Conductivity and Swelling of Nonprehydrated GCLs Permeated with Single-Species Salt Solutions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 557–567. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(557\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(557))

Kmick, R. S., Gazolla, M. G., Silva Junior, R. M. da, Capraro, A. P. B., Moreira, K. A. W., Kmick, R. S., Gazolla, M. G., Silva Junior, R. M. da, Capraro, A. P. B., & Moreira, K.

- A. W. (2021). Análisis comparativo de la efectividad y eficiencia de tres sistemas de impermeabilización. *Revista ALCONPAT*, 11(1), 34–47. <https://doi.org/10.21041/RA.V1111.509>
- Lascano Martínez, F. P. (2020). *Guía para el diseño construcción y operación de rellenos sanitarios manuales para poblaciones menores a 30.000 habitantes*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Ciencias de la Ingeniería y Gestión Ambiental. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/30854>
- Macías Fuentes, A. F. (2011). *Estudio de impacto ambiental del nuevo relleno sanitario del cantón Paján, provincia de Manabí, Ecuador*. <https://rc.upr.edu.cu/jspui/handle/DICT/71>
- Mendoza Salgado, P., & López Trujillo, V. (2004). *Estudio de la calidad de lixiviado del relleno sanitario La Esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio de flujo ascendente piloto*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2691>
- Parra, E., & Camilo, M. (2021). *COMPARACIÓN DE LAS DIVERSAS ESTRATEGIAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS, PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS EFLUENTES EN LOS RELLENOS SANITARIOS*.
- Rodríguez Cardenas, L. (2023). *Evaluación del índice de contaminación por lixiviados (ICL) en el relleno sanitario de la Provincia Andahuaylas, 2023*. <http://repositorio.unajma.edu.pe/handle/20.500.14168/838>
- Sancandi, D., & Soto, J. (2017). *“PRODUCCIÓN DE GEOMEMBRANAS DE HDPE” - ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD*.
- Shackelford, C. D., Benson, C. H., Katsumi, T., Edil, T. B., & Lin, L. (2000). Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. *Geotextiles and Geomembranes*, 18(2–4), 133–161. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00024-2](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00024-2)

Tutacano, M. H., Huaspa, E. H., Marco, B., & Cconchoy, B. (2023). Propuesta de diseño del relleno sanitario manual ubicado en el distrito de Ocoruro, provincia de Espinar - Cusco 2022. *Universidad Continental*.  
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14043>

Vélez Párraga, M. M., Cobos Lucio, D. A., Parrales Cantos, G. N., Baque Campozano, B. P., Moreno Ponce, L. A., Peralta Delgado, J. A., Zavala Vazques, C. J., Álvarez Álvarez, M. J., & Pino Tarragó, J. C. (2022). Propuesta del uso de suelo del relleno sanitario de la ciudad de Jipijapa. *Propuesta Del Uso de Suelo Del Relleno Sanitario de La Ciudad de Jipijapa*. <https://doi.org/10.26820/978-9942-602-25-1>

Zúñiga-Ruíz, P., Amaro-Espejo, I. A., Bernal-Ramírez, R. de G., Reyes-Velázquez, C., Zúñiga-Ruíz, P., Amaro-Espejo, I. A., Bernal-Ramírez, R. de G., & Reyes-Velázquez, C. (2024). Evaluación de la Calidad del Agua Subterránea Cercana a un Relleno Sanitario. *Terra Latinoamericana*, 42. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V42I0.1814>

## ANEXOS

### Anexo 1. Armado de modelos experimentales



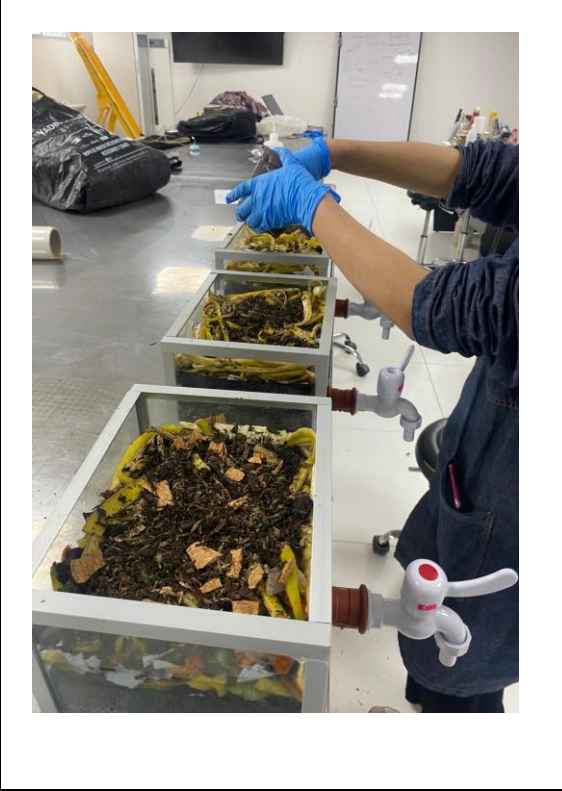
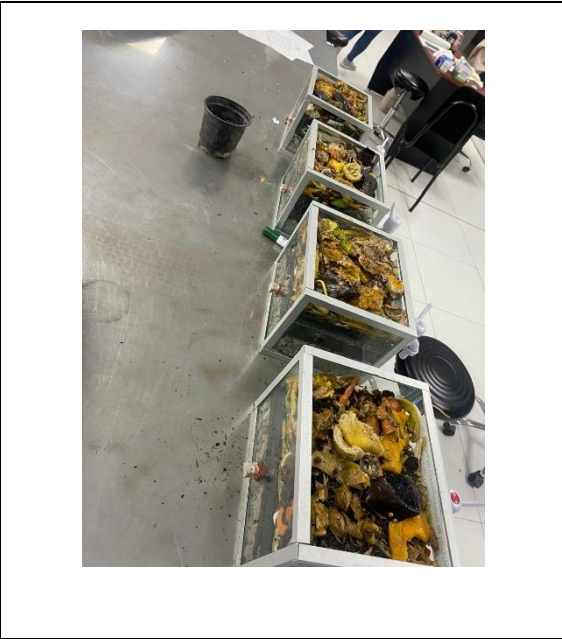
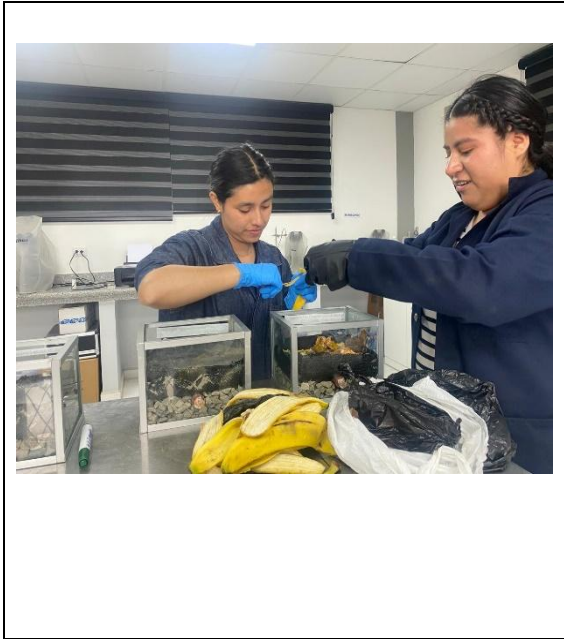
**Anexo 2. Configuración con recubrimiento solo en la base**

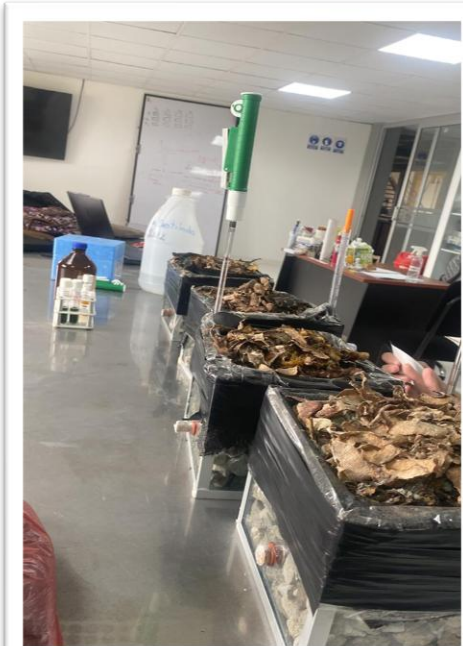


**Anexo 3.** Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.

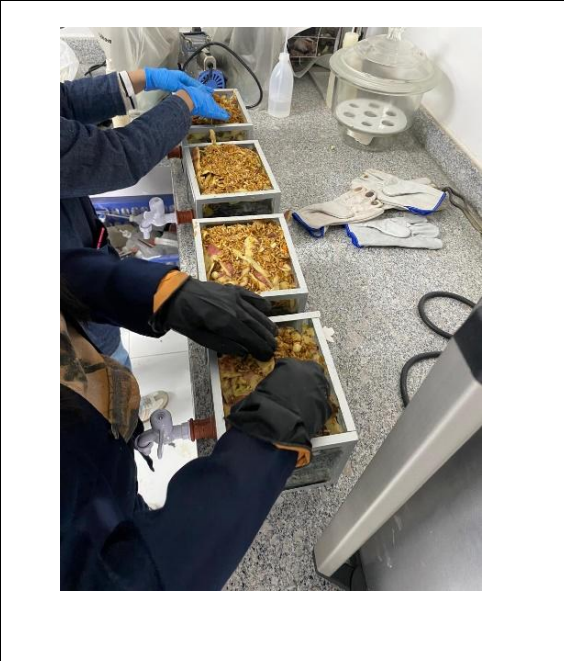
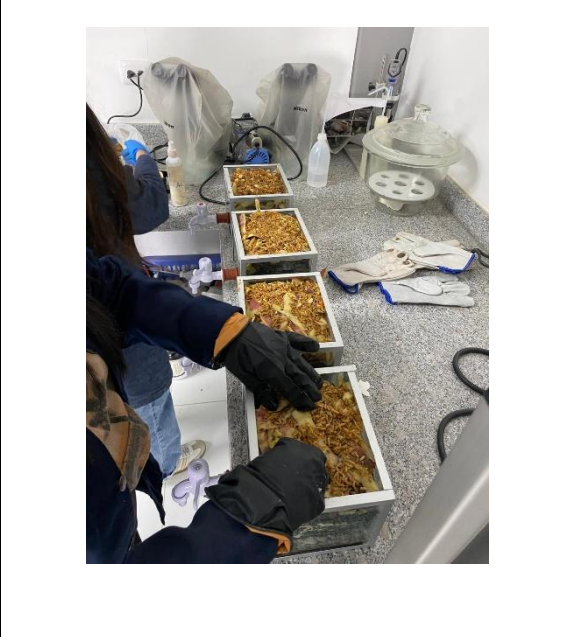
Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.













**Anexo 4. Capa de drenaje**



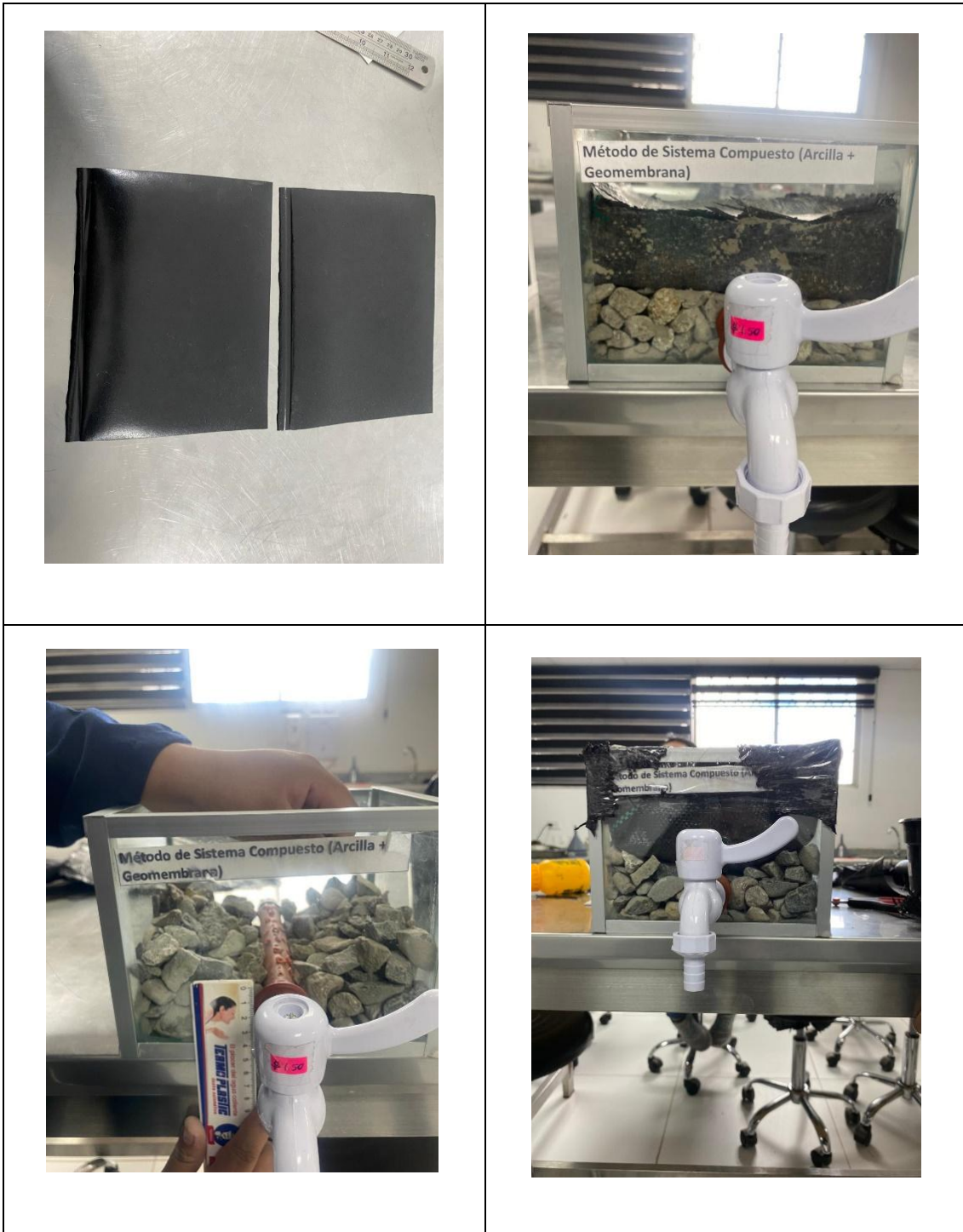


## Anexo 5. Método de arcilla compactada





## Anexo 6. Método del sistema compuesto



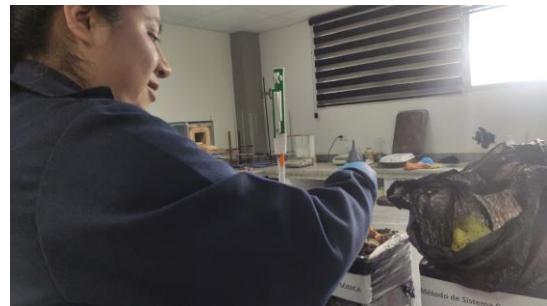


## Anexo 7. Método con Bentonita Sódica

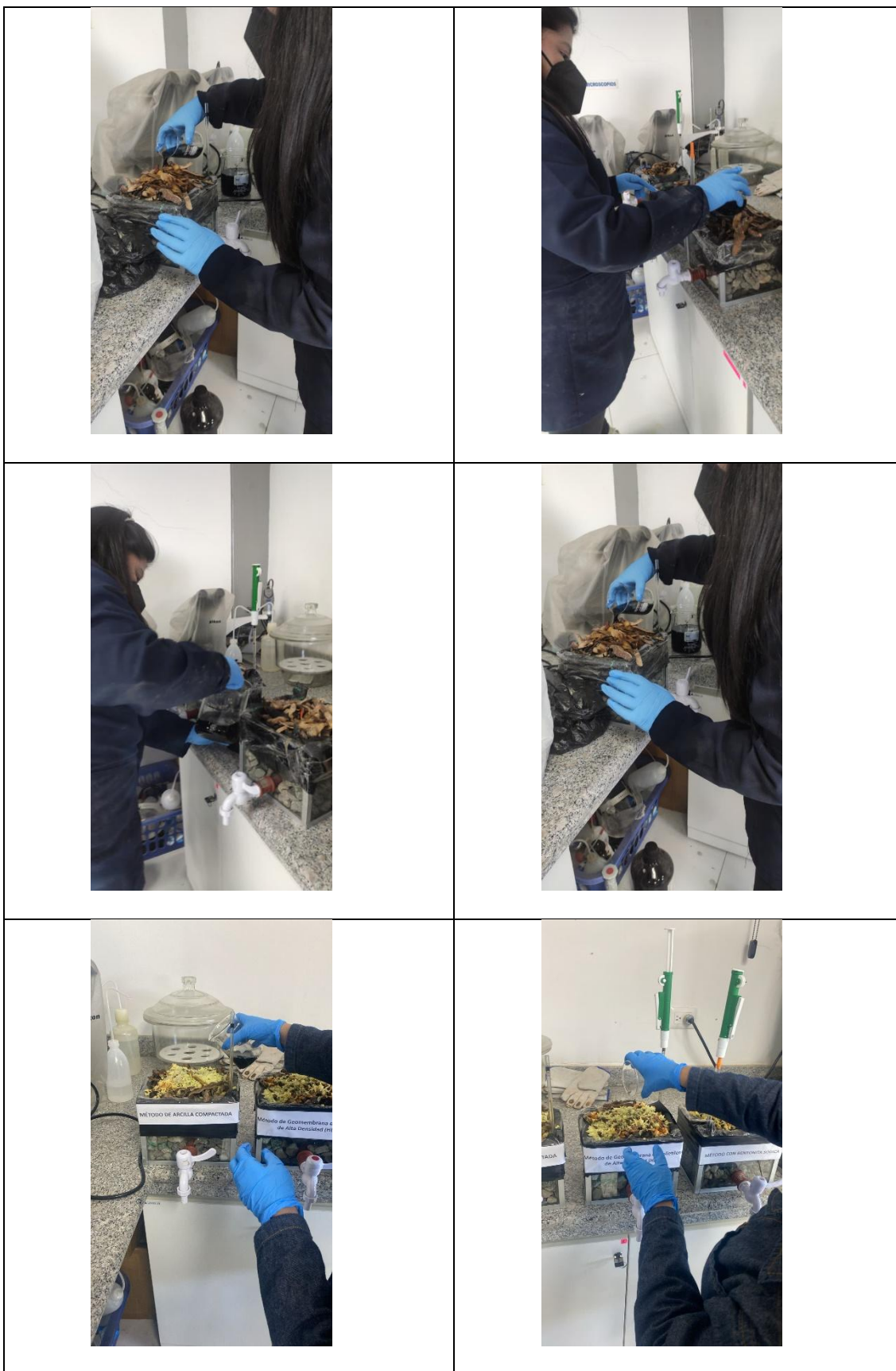


## Anexo 8. Llenado de modelos experimentales





## Anexo 9. Riego de lixiviados



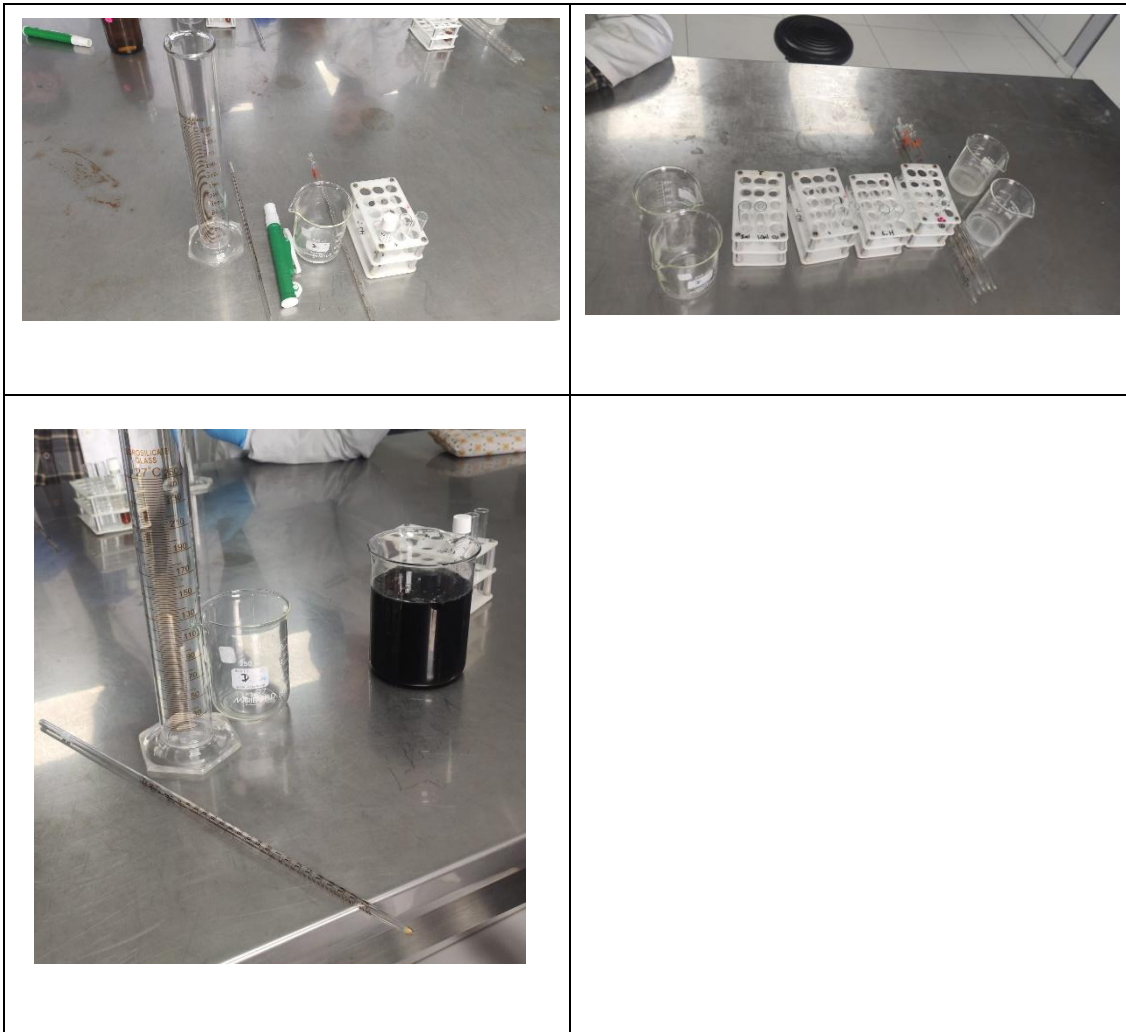


Vertido de Lixiviado en modelos experimentales sin recubrimiento



Vertido de Lixiviado en modelos experimentales sin recubrimiento

**Anexo 10.** Instrumentos utilizados



## Anexo 11. Recolección de muestras



Muestra recolectada de la geomembrana



Muestra recolectada de la Bentonita



Muestra original



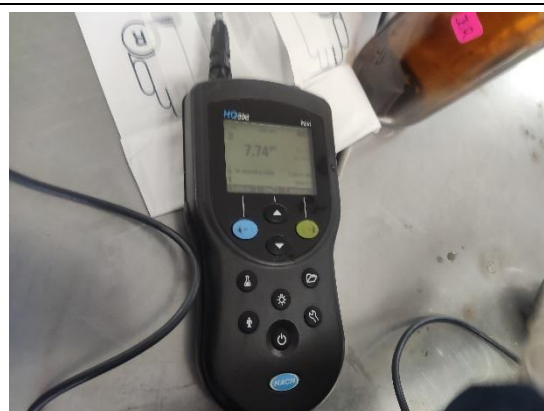
Como se recolecto las muestras



Como se recolecto las muestras



## Anexo 12. Mediciones de pH



Primera medición original



Segunda medición de la original



**Anexo 13. Ensayo de color**



Resultados de la muestra original



Resultados de la Bentonita

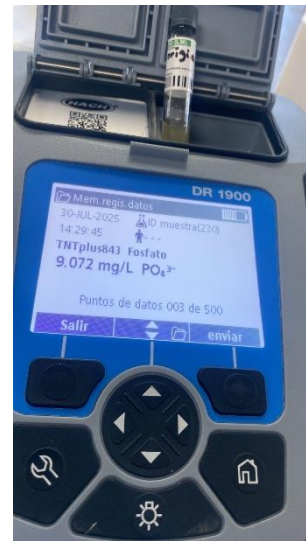


Resultados de la Geomembrana

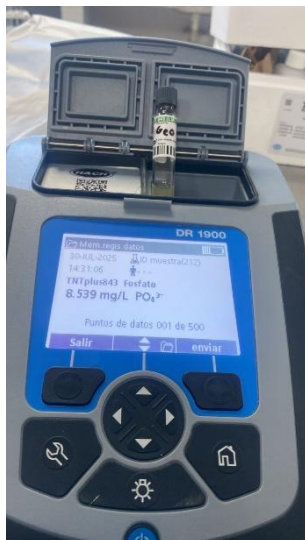
## Anexo 14. Ensayo de fosforo



Resultados con la Bentonita

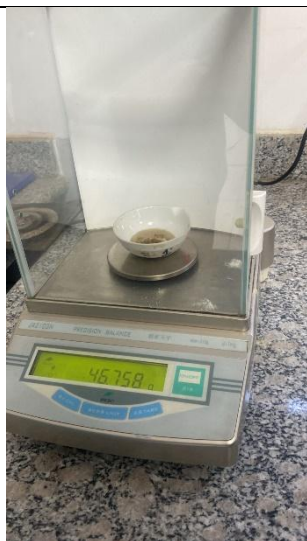


Resultados de la original

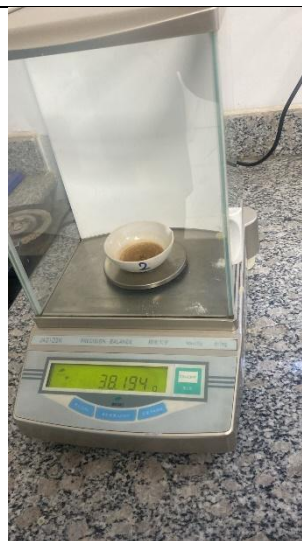


Resultados de la Geomembrana

**Anexo 15.** Ensayo de solidos suspendidos



Peso final de original



Peso final de geomembrana



Peso final de la bentonita

**Anexo 16. Ensayo de amoniaco**

 <p>DR 1900 Mem. regis. datos 30-JUL-2025 ID muestra(214) 13:21:25 4.95 mg/L N-NH<sub>3</sub> Puntos de datos 004 de 500 Salir enviar</p>	 <p>DR 1900 Mem. regis. datos 30-JUL-2025 ID muestra(215) 13:21:52 3.91 mg/L N-NH<sub>3</sub> Puntos de datos 003 de 500 Salir enviar</p>
 <p>DR 1900 Mem. regis. datos 30-JUL-2025 ID muestra(213) 13:20:21 0.72 mg/L N-NH<sub>3</sub> Puntos de datos 005 de 500 Salir enviar</p>	

Resultado de Bentonita

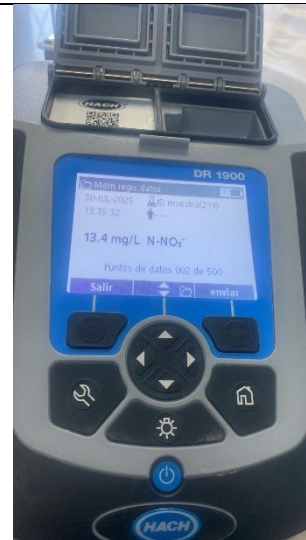
Resultado de Geomembrana

Resultados de la muestra original

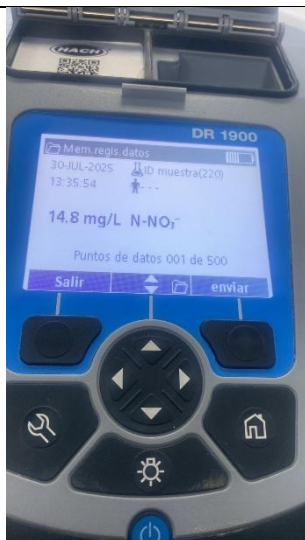
## Anexo 17. Ensayo de nitritos



Resultados de la original



Resultados de la Bentonita



Resultados de la Geomembrana

**Anexo 18. Ensayo DQO**



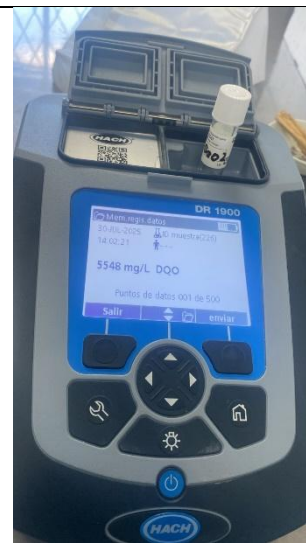
Resultados de la Geomembrana al  
50 por ciento



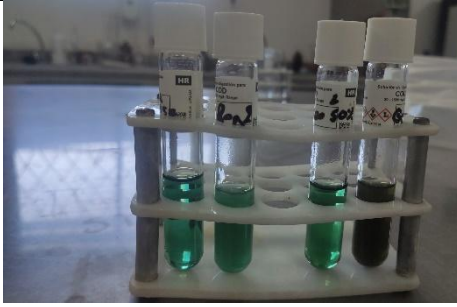
Resultados de la Bentonita normal



Resultados de la Bentonita al 50  
por ciento



Resultados de la Geomembrana  
normal

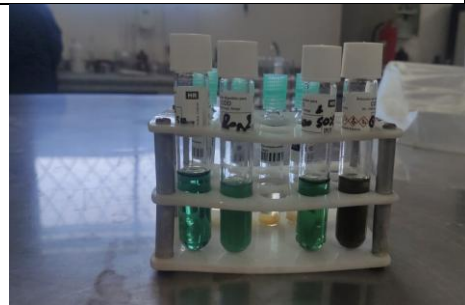
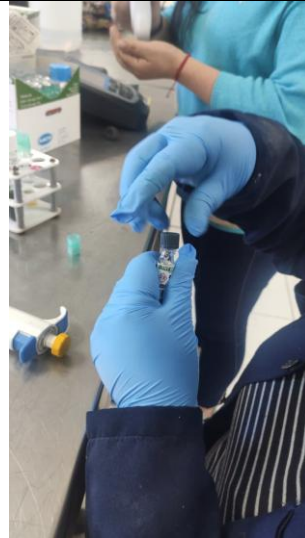
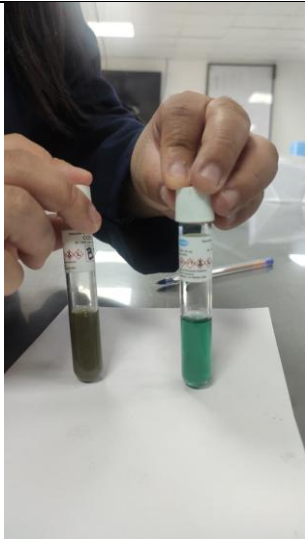


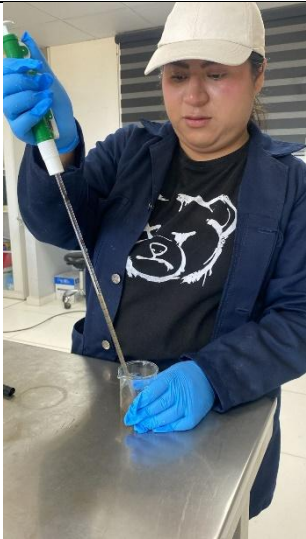
**Anexo 19. Modelos experimentales evaluados**

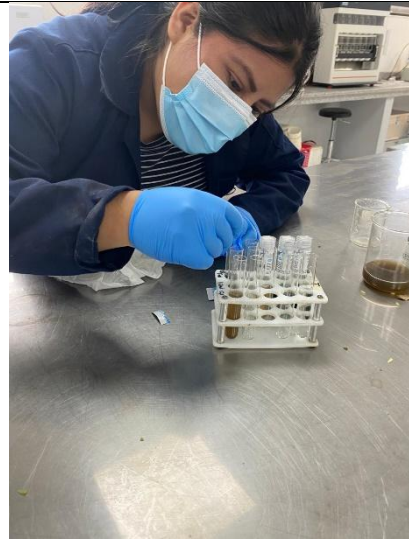




**Anexo 20.** Actividades diversas durante el desarrollo







**Anexo 21.** Caracterización físico-química del lixiviado extraído de pichacay con el método de disolución antes de vertir en los modelos experimentales

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQ</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	8119	mg/l
<b>O</b>	Lixiviado al 40% (40 mL lixiviado + 60 mL agua destilada)	6200	mg/l
	Lixiviado al 70% (70 mL lixiviado + 30 mL agua destilada)	6312	mg/l
<b>DB</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	249	mg/l
<b>O</b>	Lixiviado al 40% (40 mL lixiviado + 60 mL agua destilada)	700	mg/l
	Lixiviado al 70% (70 mL lixiviado + 30 mL agua destilada)	900	mg/l
<b>ph</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	7.95	pH
	Lixiviado al 40% (40 mL lixiviado + 60 mL agua destilada)	7.95	pH
	Lixiviado al 70% (70 mL lixiviado + 30 mL agua destilada)	7.95	pH
	<b>Nitratos</b>	15.9	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	15600	mg/l
	<b>Amonio</b>	0.679752	mg/l
	<b>Turbidez</b>	> 800	NTU
	<b>Color</b>	> 500	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	20.15	ms/cm
	<b>Fósforo Total</b>	9.072	mg/l

**Anexo 22.** Modelo experimental: Arcilla Compactada (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volumen vertido ml</b>	<b>Volumen filtrado (ml)</b>	<b>Volumen retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Se observa degradación inicial; olor ligero. Se añade basura orgánica lunes, miércoles y viernes, simulando la operación de un relleno sanitario.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Aumenta la degradación; olor moderado; presencia de mosquitos pequeños. La adición periódica de

---

					residuos (L-M-V) favorece la actividad microbiana.
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Avanza la degradación; olor fuerte y persistente; incremento de mosquitos pequeños. El ingreso constante de material fresco acelera la descomposición.
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Descomposición avanzada; olor intenso; aparición de algunas moscas junto a los mosquitos.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Materia en descomposición; olor muy fuerte; moscas en aumento y mosquitos en descenso. La adición L-M-V mantiene alta la temperatura y humedad interna
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Descomposición notable; olor penetrante; moscas visibles en gran cantidad.

---

<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Descomposición severa; olor muy intenso; abundante presencia de moscas y primeras larvas.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Materia orgánica degradada en varias capas; olor fétido; proliferación de larvas y moscas grandes.
<b>S9</b>	200	48	152	Puntual = fuga localizada por fisura	Continúa la degradación en capas más antiguas; olor muy fuerte; moscas grandes predominantes. Y se empiezan haber fugas
<b>S10</b>	200	90	110	Puntual = fuga localizada por fisura	Restos orgánicos licuados; olor nauseabundo; moscas y larvas en abundancia Combinación de material fresco y degradado; olor intenso y persistente; moscas y larvas en abundancia

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Fisuras</b>	<b>Arrastre de capas</b>	<b>Cambio de textura/color</b>	<b>de Deformaciones</b>
<b>S1</b>	Sin fisuras; material húmedo por lixiviado y basura	Sin arrastre	Color y textura iniciales	Superficie uniforme; sin deformaciones
<b>S2</b>	Sin fisuras; humedad constante	Sin arrastre	Oscurecimiento leve en zonas húmedas	Ligera compactación por peso de residuos
<b>S3</b>	Fisuras finas en zonas húmedas	Arrastre muy ligero	Textura menos compacta en superficie	Leves asentamientos
<b>S4</b>	Fisuras pequeñas visibles	Arrastre ligero	Color más oscuro	Hundimientos leves en bordes
<b>S5</b>	Fisuras finas en puntos húmedos	Arrastre ligero	Textura más blanda y oscura	Hundimientos leves y deformación en bordes
<b>S6</b>	Fisuras visibles en varias zonas	Arrastre moderado	Oscurecimiento generalizado	Hundimientos en parte central
<b>S7</b>	Fisuras con filtración visible	Arrastre moderado	Textura blanda	Hundimientos y bordes deformados
<b>S8</b>	Fisuras con filtración constante	Arrastre moderado	Color muy oscuro; textura degradada	Hundimiento central pronunciado
<b>S9</b>	Fisuras marcadas con	Arrastre moderado	Textura muy blanda	Hundimientos severos

	filtración				
	continua				
<b>S10</b>	Fisuras profundas zonas saturadas	Arrastre en moderado	Color uniforme	oscuro	Hundimientos profundos en zonas afectadas

#### 4. Parámetros Físicoquímicos del lixiviado filtrado

<b>Semana 9</b>		<b>Filtrado 48ml</b>	
	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	8575	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	2921	mg/l
	<b>pH</b>	7.77	Ph
	<b>Nitratos</b>	11.6	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	6600	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	0	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.009441	mg/l
	<b>Turbidez</b>	776	NTU
	<b>Color</b>	2366	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	9.17	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	1.809	
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	1.949	mg/l

---

**Semana 10****Filtrado 95 ml**

---

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	2147	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	1133	mg/l
	<b>pH</b>	7.73	Ph
	<b>Nitratos</b>	11.18	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	7200	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	0.594783	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	4.654413	mg/l
	<b>Turbidez</b>	969	NTU
	<b>Color</b>	3425	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	11.26	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	2.021	
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.292	mg/l

---

**Anexo 23.** Modelo experimental: Arcilla Compactada. (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volumen vertido ml</b>	<b>Volumen filtrado (ml)</b>	<b>Volumen retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Sin fisuras; material húmedo por lixiviado y basura. Olor ligero.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Sin fisuras; humedad constante. Olor moderado.
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Sin fisuras; humedad superficial. Olor más persistente.

<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras muy finas en puntos aislados; olor intenso en zonas cerradas.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras finas puntuales; olor fuerte; humedad concentrada.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras pequeñas en puntos aislados; olor fuerte; sudado en geotextil.
<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras con humedad evidente en geotextil; olor muy intenso.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras finas; filtración mínima controlada; olor fétido localizado.
<b>S9</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras más evidentes; filtración puntual; olor muy fuerte.
<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Fisuras marcadas en zonas específicas; filtración puntual; olor intenso y persistente.

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Observaciones visibles en el geotextil (sistema cerrado)</b>
<b>S1</b>	Geotextil seco, sin manchas; superficie uniforme.
<b>S2</b>	Geotextil con leve oscurecimiento en zonas de contacto con humedad interna.
<b>S3</b>	Aparición de brillo superficial en puntos aislados (“sudado” leve).
<b>S4</b>	Humedad más evidente en zonas bajas del geotextil; ligero oscurecimiento general.
<b>S5</b>	Geotextil húmedo al tacto en sectores puntuales; primeras ondulaciones leves.
<b>S6</b>	Oscurecimiento visible en zonas centrales; humedad constante en bordes.
<b>S7</b>	Zonas de geotextil con brillo y tacto húmedo; ondulación más marcada.
<b>S8</b>	Humedad evidente en varios puntos; oscurecimiento generalizado; textura más blanda.
<b>S9</b>	Manchas húmedas visibles en geotextil; hundimientos leves en la superficie.
<b>S10</b>	Oscurecimiento completo; humedad constante; hundimientos y deformaciones más notorias.

**Anexo 24.** Modelo experimental: Método del sistema compuesto (Arcilla+ Geomembrana), (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm + Geomembrana 1.5 mm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volumen vertido ml</b>	<b>Volumen filtrado (ml)</b>	<b>Volumen retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Sistema doble protege la base; olor ligero; geotextil lateral sin humedad visible.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Olor moderado; oscurecimiento leve del geotextil en zonas puntuales.

<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	“Sudado” muy leve en geotextil; textura algo más blanda en superficie
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad discreta en sectores bajos del geotextil; olor más intenso.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil húmedo al tacto en puntos aislados; olor fuerte.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Oscurecimiento visible del geotextil; humedad constante en bordes.
<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Zonas con brillo (“sudado”) en geotextil; olor persistente.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad evidente en varios puntos del geotextil; sin filtración.
<b>S9</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Manchas húmedas en geotextil; olor muy fuerte; sin filtración.
<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil uniformemente oscuro y húmedo; sin filtración

---

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Fisuras</b>	<b>Arrastre de capas</b>	<b>de Cambio de textura/color</b>	<b>de Deformaciones</b>
<b>S1</b>	Sin fisuras	Sin arrastre	Geotextil y material con aspecto inicial	Superficie uniforme; sin deformaciones
<b>S2</b>	Sin fisuras	Sin arrastre	Leve oscurecimiento del geotextil	Ligera compactación por peso de residuos
<b>S3</b>	Sin fisuras	Muy ligero (superficial)	Geotextil con "sudado" leve; textura algo más blanda	Leves asentamientos
<b>S4</b>	Sin fisuras	Ligero	Zonas puntuales más oscuras	Hundimientos leves en bordes
<b>S5</b>	Sin fisuras	Ligero	Geotextil húmedo en puntos; textura más blanda	Hundimientos leves y mínima deformación en bordes
<b>S6</b>	Sin fisuras	Ligero–moderado	Oscurecimiento general del geotextil	Hundimientos leves en parte central
<b>S7</b>	Sin fisuras	Moderado (superficie)	Textura blanda en zonas húmedas del geotextil	Hundimientos leves y bordes ligeramente deformados
<b>S8</b>	Sin fisuras	Moderado	Geotextil con humedad evidente; color más oscuro	Hundimiento central leve
<b>S9</b>	Sin fisuras	Moderado	Zonas muy blandas y húmedas en el geotextil	Hundimientos moderados
<b>S10</b>	Sin fisuras	Moderado	Geotextil oscuro y húmedo de forma uniforme	Hundimientos más notorios en áreas concretas

**Anexo 25.** Modelo experimental: Método del sistema compuesto (Arcilla+ Geomembrana).(Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención. )

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de Arcilla Compactada impermeabilizante</b>	
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm + Geomembrana 1.5 mm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volumen vertido ml</b>	<b>Volumen filtrado (ml)</b>	<b>Volumen retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Sistema doble protege la base; olor ligero; geotextil lateral sin humedad visible.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Olor moderado; oscurecimiento leve del

---

					geotextil en zonas puntuales.
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	“Sudado” muy leve en geotextil; textura algo más blanda en superficie
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad discreta en sectores bajos del geotextil; olor más intenso.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil húmedo al tacto en puntos aislados; olor fuerte.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Oscurecimiento visible del geotextil; humedad constante en bordes.
<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Zonas con brillo (“sudado”) en geotextil; olor persistente.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad evidente en varios puntos del geotextil; sin filtración.
<b>S9</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Manchas húmedas en geotextil; olor muy fuerte; sin filtración.

---

<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil uniformemente oscuro y húmedo; sin filtración
------------	-----	---	-----	---------------------------	---

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Observaciones visibles en el geotextil (sistema compuesto)</b>
<b>S1</b>	Geotextil seco, sin manchas; superficie uniforme.
<b>S2</b>	Geotextil con leve oscurecimiento en zonas de contacto; humedad no visible en superficie.
<b>S3</b>	Brillo superficial muy leve; geotextil limpio y sin ondulaciones.
<b>S4</b>	Ligero oscurecimiento en áreas específicas; sin humedad al tacto.
<b>S5</b>	Oscurecimiento puntual y leve humedad en sectores aislados.
<b>S6</b>	Humedad mínima en bordes; textura superficial estable.
<b>S7</b>	Oscurecimiento leve en áreas centrales; sin filtración visible.
<b>S8</b>	Geotextil con puntos aislados de humedad; ondulación leve sin deformaciones.
<b>S9</b>	Pequeñas manchas oscuras por humedad interna; estructura compacta estable.
<b>S10</b>	Oscurecimiento uniforme; humedad leve; sin hundimientos significativos.

**Anexo 26.** Modelo experimental: Bentonita Sódica POWERGROUND. (Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volumen vertido ml</b>	<b>Volumen filtrado (ml)</b>	<b>Volumen retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Inicio de hidratación de la bentonita; olor ligero; geotextil superior seco.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Hinchamiento incipiente; geotextil con oscurecimiento leve por humedad.

<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Formación de gel bentonítico; olor moderado; sin filtración.
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Hinchamiento estable; autosello en poros; geotextil con 'sudado' leve.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Barrera activa; olor más intenso por residuos; sin filtración.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Matriz gelificada; humedad uniforme; retención completa.
<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil con humedad visible en puntos; sin escurrimientos.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Barrera mantiene autosello; olor fuerte persistente; sin filtración.
<b>S9</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Condición estable; geotextil más oscuro por humedad sostenida.

<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Retención geotextil uniforme; sin filtración.	total; y
------------	-----	---	-----	---------------------------	---	----------

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Fisuras</b>	<b>Arrastre de capas</b>	<b>Cambio de textura/color</b>	<b>de</b>	<b>Deformaciones</b>
<b>S1</b>	Sin fisuras; inicio de hidratación	Sin arrastre	Color inicial; textura seca a ligeramente húmeda		Superficie uniforme
<b>S2</b>	Sin fisuras; hinchamiento leve	Muy ligero (polvo superficial)	Oscurecimiento leve del geotextil		Ligera compactación por peso
<b>S3</b>	Sin fisuras; matriz gelificada	Ligero	Textura gel en la superior; color más oscuro		Asentamientos leves
<b>S4</b>	Sin fisuras; autosello en poros	Ligero	Textura estable, húmeda y densa		Hundimientos leves en bordes
<b>S5</b>	Sin fisuras	Ligero– moderado en superficie	Textura blanda en húmedas; color más oscuro		Deformación mínima en bordes

<b>S6</b>	Sin fisuras	Moderado	Oscurecimiento superficial	Hundimiento leve en parte central
<b>S7</b>	Sin fisuras	Moderado	Geotextil con humedad visible; textura blanda localizada	Hundimientos leves; bordes ligeramente deformados
<b>S8</b>	Sin fisuras	Moderado	Color oscuro; textura blanda estable	Hundimiento central leve
<b>S9</b>	Sin fisuras	Moderado	Zonas húmedas; textura blanda sostenida	Hundimientos moderados puntuales
<b>S10</b>	Sin fisuras	Moderado	Geotextil oscuro y húmedo de forma uniforme	Hundimientos notorios en áreas concretas

**Anexo 27.** Modelo experimental: Bentonita Sódica POWERGROUND. (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	5 cm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Sema na</b>	<b>Volum en vertido ml</b>	<b>Volum en filtrad o (ml)</b>	<b>Volum en retenid o (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil uniforme y seco; sin manchas; olor ligero.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Leve oscurecimiento puntual; sin "sudado".
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Brillo superficial leve ("sudado")

---

					incipiente) en 1–2 puntos.
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad discreta en zonas bajas; olor moderado.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geotextil húmedo al tacto en bordes; ondulación muy leve.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Oscurecimiento central más notorio; sin goteo.
<b>S7</b>	200	3.5	196.5	Min. = humedad filtrada mínima	Aparecen fisuras finas en un borde/solape; “sudado” persistente.
<b>S8</b>	200	10	190	Min. = humedad filtrada mínima	Ingreso de lixiviado por fisura; goteo esporádico en vértice.
<b>S9</b>	200	50	150	Puntual = fuga localizada por fisura	Punto de fuga activo; manchas oscuras más amplias.
<b>S10</b>	200	100	100	Puntual = fuga localizada por fisura	Goteo leve sostenido;

---

ondulación/hundimiento local alrededor.

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

#### **Semana Observaciones visibles en el geotextil (sistema cerrado)**

<b>S1</b>	Geotextil seco, sin manchas; superficie uniforme.
<b>S2</b>	Leve oscurecimiento en zonas de contacto; sin humedad al tacto.
<b>S3</b>	“Sudado” muy leve en puntos aislados; sin deformaciones.
<b>S4</b>	Humedad discreta en zonas bajas; sin ondulaciones marcadas.
<b>S5</b>	Húmedo al tacto en bordes; ondulación leve y localizada.
<b>S6</b>	Oscurecimiento central; superficie estable, sin goteo.
<b>S7</b>	Fisuras finas visibles en borde/solape; nuevas manchas húmedas.
<b>S8</b>	Entrada de lixiviado por fisura; goteo esporádico en vértice.
<b>S9</b>	Goteo intermitente; hundimiento leve junto al punto de fisura.
<b>S10</b>	Humedad generalizada cerca de la fisura; goteo leve sostenido; deformación local.

### 4. Parámetros Físicoquímicos del lixiviado filtrado

#### **Semana 7 Filtrado 3ml**

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	17176	mg/l

Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	6009	mg/l
--	------	------

---

**Semana 8** **Filtrado 10 ml**

---

<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b> Muestra Pura (100% Lixiviado)	5694	mg/l
Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	1866	mg/l
<b>pH</b>	7.43	pH
<b>Nitratos</b>	13.4	mg/l
<b>Sólidos Disueltos totales</b>	9000	mg/l
<b>Amonio</b>	4.673295	mg/l
<b>Turbidez</b>	> 800	NTU
<b>Color</b>	3775	Pt/Co
<b>Conductividad</b>	7.2	ms/cm
<b>Fósforo Total</b>	1.844	mg/l

---

**Semana 9** **Filtrado 50 ml**

---

<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b> Muestra Pura (100% Lixiviado)	6763	mg/l

	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	2012	mg/l
	<b>pH</b>	7.6	Ph
	<b>Nitratos</b>	14.2	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	2000	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	4.24	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.075528	mg/l
	<b>Turbidez</b>	776	NTU
	<b>Color</b>	803	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	8.8	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	4.143	mg/l
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	3.839	mg/l

**Semana 10**

**Filtrado 100 ml**

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	2108	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	1588	mg/l
	<b>pH</b>	7.94	Ph
	<b>Nitratos</b>	11.6	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	11320	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	2.039256	mg/l

---

	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	4.333419	mg/l
	<b>Turbidez</b>	832	NTU
	<b>Color</b>	3215	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	11.26	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	1.806	mg/l
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.765	mg/l

---

**Anexo 28.** Modelo experimental: Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE).(Configuración con recubrimiento solo en la base. Las paredes laterales no están impermeabilizadas completamente.)

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	1.5 mm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volume vertido ml</b>	<b>Volume filtrado (ml)</b>	<b>Volume retenido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geomembrana limpia, sin filtración; geotextil seco y uniforme.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Leve oscurecimiento puntual;

---

					sin humedad aparente.
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Brillo superficial leve en geotextil; sin ondulaciones
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad superficial muy leve en puntos aislados; sin filtración.
<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad discreta en zonas bajas; olor moderado.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Oscurecimiento más notorio en zonas centrales; sin filtración.
<b>S7</b>	200	3	197	Min. = humedad filtrada mínima	Primeras filtraciones

---

---

					visibles por unión o esquina; humedad localizada.
<b>S8</b>	200	30	170	Puntual = fuga localizada por fisura	Aumento de la filtración; goteo moderado y manchas más oscuras.
<b>S9</b>	200	40	160	Puntual = fuga localizada por fisura	Filtración evidente; manchas extendidas y olor más fuerte.
<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Filtración intensa; goteo constante y deformacion es visibles.

---

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Fisuras</b>	<b>Arrastre de capas</b>	<b>Cambio de textura/color</b>	<b>de Deformaciones</b>
<b>S1</b>	Sin fisuras; material húmedo por lixiviado y basura	Sin arrastre	Color y textura iniciales	Superficie uniforme; sin deformaciones
<b>S2</b>	Sin fisuras; humedad constante	Sin arrastre	Oscurecimiento leve en zonas húmedas	Ligera compactación por peso de residuos
<b>S3</b>	Fisuras finas en zonas húmedas	Arrastre muy ligero	Textura menos compacta en superficie	Leves asentamientos
<b>S4</b>	Fisuras pequeñas visibles	Arrastre ligero	Color más oscuro	Hundimientos leves en bordes
<b>S5</b>	Fisuras finas en puntos húmedos	Arrastre ligero	Textura más blanda y oscura	Hundimientos leves y deformación en bordes
<b>S6</b>	Fisuras visibles en varias zonas	Arrastre moderado	Oscurecimiento generalizado	Hundimientos en parte central
<b>S7</b>	Fisuras con filtración visible	Arrastre moderado	Textura blanda	Hundimientos y bordes deformados
<b>S8</b>	Fisuras con filtración constante	Arrastre moderado	Color muy oscuro; textura degradada	Hundimiento central pronunciado
<b>S9</b>	Fisuras marcadas con	Arrastre moderado	Textura muy blanda	Hundimientos severos

	filtración				
	continua				
<b>S10</b>	Fisuras profundas en zonas saturadas	Arrastre en moderado	Color uniforme	oscuro	Hundimientos profundos en zonas afectadas

4. Parámetros Físicoquímicos del lixiviado filtrado

<b>Semana 7</b>	<b>Filtrado 3ml</b>
-----------------	---------------------

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	12725	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	7209	mg/l

<b>Semana 8</b>	<b>Filtrado 30ml</b>
-----------------	----------------------

	<b>Parámetros</b>	<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	5548	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	2020	mg/l
	<b>pH</b>	6.2	pH
	<b>Nitratos</b>	13.4	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	10400	mg/l

<b>Amonio</b>	3.691431	mg/l
<b>Turbidez</b>	>800	NTU
<b>Color</b>	4500	Pt/Co
<b>Conductividad</b>	6.49	ms/cm
<b>Fósforo Total</b>	8.539	mg/l

**Semana 9**

**Filtrado 40ml**

<b>Parámetros</b>		<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	4984	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	2361	mg/l
	<b>pH</b>	7.52	pH
	<b>Nitratos</b>	13.5	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	1200	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	0	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.066087	mg/l
	<b>Turbidez</b>	>800	NTU
	<b>Color</b>	4853	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	5.7	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	5.61	mg/l
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	5.095	mg/l

<b>Semana 10</b>	<b>Filtrado 40ml</b>
------------------	----------------------

<b>Parámetros</b>		<b>Fracción soluble</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>DQO</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	4937	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	2451	mg/l
	<b>pH</b>	7.52	pH
	<b>Nitratos</b>	13.5	mg/l
	<b>Sólidos Disueltos totales</b>	2500	mg/l
<b>Amonio</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	0	mg/l
	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	0.084969	mg/l
	<b>Turbidez</b>	>800	NTU
	<b>Color</b>	4865	Pt/Co
	<b>Conductividad</b>	5.8	ms/cm
<b>Fósforo</b>	Muestra Pura (100% Lixiviado)	5.61	mg/l
<b>Total</b>	Lixiviado al 50% (1 mL lixiviado + 1 mL agua destilada)	5.075	mg/l

**Anexo 29.** Modelo experimental: Método de Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), (Configuración con impermeabilización completa: base y paredes recubiertas para simular un sistema cerrado de contención. )

1. Datos Técnicos del Modelo experimental

<b>Tipo de impermeabilizante</b>	<b>Arcilla Compactada</b>
<b>Espesor de capa impermeable (cm)</b>	1.5 mm
<b>Coefficiente de permeabilidad (cm/s)</b>	
<b>Protección superior/inferior</b>	Geotextil tejido

2. Registro Semanal

<b>Semana</b>	<b>Volu men do ml</b>	<b>Volu filtra do (ml)</b>	<b>Volu reten ido (ml)</b>	<b>Fugas visibles</b>	<b>Cambios visuales / olor</b>
<b>S1</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Geomembrana limpia, sin filtración; geotextil seco y uniforme.
<b>S2</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Leve oscurecimiento puntual; sin humedad aparente.
<b>S3</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Brillo superficial leve en geotextil; sin ondulaciones.
<b>S4</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad superficial muy leve en puntos aislados; sin filtración.

<b>S5</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Humedad discreta en zonas bajas; olor moderado.
<b>S6</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Oscurecimiento más notorio en zonas centrales; sin filtración.
<b>S7</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Superficie estable; sin presencia de humedad o filtraciones.
<b>S8</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Condiciones estables; sin cambios significativos.
<b>S9</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Superficie uniforme; sin manchas ni goteo.
<b>S10</b>	200	0	200	NF = No se observan fugas	Condiciones iniciales mantenidas; sin signos de deterioro.

### 3. Grado de Alteración Visual del Material

<b>Semana</b>	<b>Observaciones visibles en el geotextil (sistema cerrado)</b>
<b>S1</b>	Geomembrana y geotextil completamente secos; sin cambios de color ni deformaciones.
<b>S2</b>	Sin signos de humedad; superficie intacta, textura firme y uniforme.
<b>S3</b>	Superficie lisa y sin irregularidades; sin humedad ni brillo superficial.
<b>S4</b>	Condiciones estables; sin ondulaciones ni acumulación de humedad.
<b>S5</b>	Sin alteraciones visibles; geotextil seco y sin olores.

---

<b>S6</b>	Superficie y uniones en perfecto estado; sin filtración ni manchas.
<b>S7</b>	Estado inalterado; sin evidencia de filtraciones o degradación.
<b>S8</b>	Sin deformaciones ni humedad; textura consistente.
<b>S9</b>	Superficie limpia y estable; sin desgaste o pérdida de integridad.
<b>S10</b>	Condiciones finales sin cambios; sin humedad, filtraciones o daños estructurales.

---

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotras, **Ana Belén Astudillo Mejía** y **Johanna Gabriela Landi Villa** portadoras de las cédulas de ciudadanía N.º 0106055064 y 0150713220. En calidad de autoras y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Evaluación de métodos de impermeabilización en rellenos sanitarios: Caso Pichacay – Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de octubre de 2025

F:  ANA BELEN ASTUDILLO  
MEJIA  
Validar digitalmente con FirmacE

Ana Belén Astudillo Mejía  
0106055064

F:  JOHANNA GABRIELA  
LANDI VILLA  
Validar digitalmente con FirmacE

Johanna Gabriela Landi Villa  
0150713220