

Escuela de posgrados.

“ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PAUTE”

Máster en gestión integral de residuos sólidos.

Karen Condo Segarra.

Pedro Zhindón Sarmiento.

César Arévalo Vélez.

Cuenca, Ecuador, 2026.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mi abuelo (+), en cada paso que doy es mi guía espiritual y quien siempre llevaré en mi corazón. A mi Juana Emilia, quien supo romper un círculo y haber sembrado el formarse profesionalmente en la familia, sé que es una mujer fuerte que sabe elegir y brindarme ejemplo de nobleza y bondad.

Karen Condo S.

Quiero dedicar este trabajo primero, a Dios, por guiar cada paso de mi camino, darme fortaleza en todo momento y permitirme culminar esta etapa de mi formación profesional.

A mis hermanos y mi tía Cati, por ser el pilar fundamental de mi vida.

A mi mamá, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo constante, siendo siempre la fuerza que me impulsó a seguir adelante.

Y de manera muy especial, a mi papá, quien sembró en mí la pasión por este campo. Gracias por inspirarme, por compartir sus conocimientos y por motivarme a crecer profesionalmente. Usted es un ejemplo de sabiduría y dedicación; aspiro algún día alcanzar su capacidad, su amplio conocimiento en esta profesión y su visión. Este logro también refleja su enseñanza y su guía.

Pedro Zhindón S.

Agradecimiento.

Agradezco a Dios, por haberme brindado paciencia, constancia y dedicación para culminar este camino.

A mi familia por ser siempre el impulso para formarme profesional y personalmente, son ejemplo de sabiduría, empatía y amor.

A todos los docentes que formaron parte de este camino y de manera especial al director de este trabajo, Ing. César Arévalo, por enseñarnos con tanta pasión y dedicación.

A Dianita y Paola por su conocimiento, compartir, apoyo y amistad.

A Pedro, por su confianza, por compartir sus conocimientos conmigo. Este camino ha sido largo, pero ligero con su apoyo.

Karen Condo S.

Quiero agradecer a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi formación personal y profesional, brindándome siempre su apoyo incondicional, valores y motivación para alcanzar cada una de mis metas.

A mis hermanos, por su compañía, confianza y respaldo en cada etapa de este proceso.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos, guía y dedicación, los cuales han sido fundamentales en mi desarrollo académico y en la culminación de esta tesis.

A mi compañera Karen, gracias por tu apoyo y compromiso durante este camino. Agradezco el esfuerzo compartido para alcanzar este logro.

Pedro Zhindón S.

Resumen:

El presente estudio desarrolla el análisis y la reingeniería del relleno sanitario del cantón Paute, con el objetivo de evaluar su estado actual y proponer soluciones técnicas que optimicen su operación y prolonguen su vida útil. La investigación se fundamenta en un enfoque integral que incluye caracterización de residuos sólidos, análisis geotécnico, evaluación operativa y diseño de alternativas de mejora.

La generación de residuos sólidos fue estimada en 10.07 toneladas diarias, con una producción per cápita entre 0.51 kg/hab/día y una cobertura del servicio del 65%, lo cual representa la existencia de fracciones no gestionadas adecuadamente. La caracterización determinó un porcentaje de materia orgánica del 70%, lo cual influye directamente en la generación de lixiviados con alta carga contaminante, reflejada en valores de DBO_5 (146.22 mg/L) y DQO (392.02 mg/L).

En la evaluación operativa se identificaron deficiencias críticas, tales como la falta de control en el ingreso de residuos, maquinaria especializada y manejo limitado de lixiviados y biogás, lo que ha derivado en una reducción de la eficiencia del sistema y de su vida útil. Se propone la implementación de un sistema de disposición mediante el método de vaguada, acompañado del uso de retroexcavadora sobre orugas como alternativa de compactación, alcanzando densidades de hasta 800 kg/m³.

El volumen disponible para la ampliación se estimó en 41.565 m³, cubriendo aproximadamente el 78.2 % de la demanda proyectada a 7 años (52,266 m³), lo que equivale a una vida útil aproximada de 7 años. Adicionalmente, se plantea el mejoramiento del sistema de tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales y el fortalecimiento de las prácticas de gestión integral de residuos sólidos.

Los resultados visibilizan que la sostenibilidad del sistema no depende únicamente de mejoras estructurales, sino de la implementación de estrategias integrales que incluyan control operativo, optimización técnica y educación ambiental.

Palabras clave:

Relleno sanitario, residuos sólidos, lixiviados, humedales artificiales, compactación, gestión integral.

Abstract

This study analyzes and reengineers the landfill in the Paute canton, with the aim of assessing its current condition and proposing technical solutions to optimize its operation and extend its useful life. The research is based on a comprehensive approach that includes solid waste characterization, geotechnical analysis, operational assessment, and the design of improvement alternatives.

Solid waste generation was estimated at 10.07 tons per day, with per capita production between 0.51 kg/person/day and a service coverage of 65%, indicating the existence of waste streams that are not being managed properly. The characterization determined an organic matter percentage of 70%, which directly influences the generation of leachate with a high pollutant load, reflected in BOD_5 (146.22 mg/L) and COD (392.02 mg/L) values.

The operational assessment identified critical deficiencies, including lack of control over waste inflow, absence of specialized machinery, and limited leachate and biogas management, resulting in reduced system efficiency and shortened lifespan. To address these issues, the implementation of a disposal system based on the area method is proposed, combined with the use of a crawler excavator as an alternative compaction mechanism, achieving densities of up to 800 kg/m³.

The available capacity for expansion was estimated at 41.565 m³, covering approximately 78.2% of the projected demand over the next 7 years (52,266 m³), which is equivalent to an estimated useful life of about 7.9 years. Additionally, the plan calls for improving the leachate treatment system through artificial wetlands and strengthening comprehensive solid waste management practices.

The results show that the sustainability of the system depends not only on structural improvements but also on the implementation of comprehensive strategies that include operational control, technical optimization, and environmental education.

Keywords:

Landfill, solid waste, leachate, constructed wetlands, compaction, integrated management.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CESAR VINICIO
AREVALO VELEZ

Índice de contenido

Contenido

1. Introducción 5
2. Marco teórico 6
2.1 Gestión integral de residuos sólidos 6
2.2 Relleno Sanitario 6
2.3 Ampliación de rellenos sanitarios 6
2.4 Métodos de disposición de residuos 7
2.5 Producción y proyección de residuos 7
2.6 Generación y manejo de lixiviados 8
2.7 Humedales artificiales 8
2.8 Manejo de biogás 9
2.9 Diseño de celdas y terrazas 9
2.10 Impactos ambientales y medidas de mitigación 10
2.11 Selección para nuevos espacios en rellenos sanitarios 10
2.12 Análisis multicriterio 10
3. Objetivos 11
3.1 Objetivo General 11
3.2 Objetivos específicos 11
4. Diagnóstico 12
4.1 Descripción de la zona de estudio 12
4.2 Generación de Residuos Sólidos 13
4.3 Caracterización de residuos sólidos del Cantón Paute 13
4.4 Incidencia de la composición de los residuos sólidos en la gestión del relleno sanitario 14
4.5 Estado actual del relleno sanitario- Descripción general 14
4.6 Generación per cápita y total diaria de residuos 17
4.7 Densidad de los residuos sólidos 17
4.8 Geología de la zona de estudio 17
4.9 Análisis de la calidad de agua que sale del relleno sanitario 18
4.10 Procesos de tratamiento 19
4.11 Datos generales 20
5. Resultados 22
5.1 Diseño de la celda 22
5.1.1 Levantamiento topográfico 22
5.1.2 Generación per cápita y total diaria de residuos 23
5.1.3 Composición física de los residuos sólidos de disposición final 23
5.1.4 Caracterización de los suelos del relleno sanitario 24
5.2 Análisis de la calidad de agua que sale del relleno sanitario 29

5.2.1 Descripción del estudio de calidad de agua 29
5.2.2 Interpretación técnica de los resultados 29
5.2.3 Implicaciones para el diseño de la nueva celda 29
5.2.4 Conclusiones del análisis de calidad del agua 30
5.3 Parámetros de diseño 30
5.3.1 Período de diseño 30
5.3.2 Proyección de población 30
5.3.3 Producción per cápita 31
5.3.4 Aprovechamiento de volumen por asentamiento de los residuos sólidos. 31
5.3.5 Cobertura de la recolección de desechos 32
5.3.6 Proyección de la producción y recolección de residuos sólidos 32
5.4 Ampliación del relleno Sanitario 33
5.4.1 Evaluación de la viabilidad técnica y administrativa del emplazamiento actual 33
5.4.2 Síntesis de viabilidad 34
5.4.3 Comparación entre mantener y relocalizar el relleno sanitario 35
5.4.4 Justificación de la ampliación 36
5.5 Compactación y densidades 37
5.5.1 Volumen del relleno sanitario 37
5.6 Selección de equipos para la optimización de la compactación de residuos 40
5.7 Dimensionamiento de la celda de confinamiento 41
5.7.1 Método de Vaguada 41
5.7.2 Secuencia de la construcción de Áreas 43
5.8 Construcción de celdas diarias 43
5.8.1 Aclaración del dimensionamiento de la celda operativa tipo 44
5.8.2 Recomendación de cobertura temporal 45
5.8.3 Celdas en el método de Vaguada 47
5.8.4 Plataforma para maniobras 48
5.9 Drenaje y evacuación de lixiviados 49
5.9.1 Descripción de la red de drenaje 49
5.9.2 Parámetros y bases de diseño 50
5.9.3 Drenes para lixiviados 52
5.9.4 Colector de lixiviados 54
5.10 Tratamiento de lixiviados 55
5.10.1 Caracterización del lixiviado 55
5.10.2 Procesos de tratamiento 56
5.10.3 Capacidad hidráulica del humedal artificial 58
5.11 Cunetas de aguas lluvias 60
5.12 Impermeabilización de las superficies 61
5.13 Análisis de estabilidad de taludes 62

5.13.1 Configuración de la ampliación 62
5.13.2 Parámetros adoptados y fundamento bibliográfico 63
5.13.3 Criterio e interpretación de la estabilidad 64
5.13.4 Estudios complementarios y alcance de la evaluación 65
5.14 Material de cobertura 65
5.15 Manejo de gases 65
6. Discusión 68
7. Conclusión 70
8. Referencias 72
9. Anexos 74

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Mapa de ubicación 12
Ilustración 2. Ubicación del relleno sanitario 12
Ilustración 3. Operación con maquinaria en el relleno sanitario. 15
Ilustración 4. Situación actual del relleno sanitario 16
Ilustración 5. Presencia de vectores. 16
Ilustración 6. Fotografía aérea 22
Ilustración 7. Clasificación de residuos generados en Paute. 24
Ilustración 8. Mapa de sectorización 26
Ilustración 9. Mapa de Peligro Sísmico 27
Ilustración 10. Implantación General del Relleno Sanitario 37
Ilustración 11. Método de Vaguada 41
Ilustración 12. Estado actual de las terrazas. 42
Ilustración 13. Vistas de celda diaria 46
Ilustración 14. Proceso completo de relleno sanitario 47
Ilustración 15. Celdas de desechos, métodos de vaguada 48
Ilustración 16. Plataforma para maniobras y acopio de materiales. 49
Ilustración 17. Esquema referencial Sistema de Drenaje y Evacuación de Lixiviado 49
Ilustración 18. Dren principal. 54
Ilustración 19. Esquema de procesos del humedal artificial. 57
Ilustración 20. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. 57
Ilustración 21. Cunetas para aguas lluvias 60
Ilustración 22. Sección transversal de la calzada 61
Ilustración 23. Capas de impermeabilización de la celda. 62
Ilustración 24. Configuración referencial y parámetros adoptados para el análisis teórico de estabilidad. 63
Ilustración 25. Banco de material de cobertura 65
Ilustración 26. Implantación de chimeneas 66
Ilustración 27. Perfil chimeneas 66

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados del ensayo triaxial UU, muestra B-1 a 1,00 m (referencia). 18
Tabla 2. Resultados del análisis de calidad de agua de lixiviados. 19
Tabla 3. Datos generales 20
Tabla 4. Composición física de los residuos de disposición final 23
Tabla 5. Parámetros del suelo adoptados para el análisis 28
Tabla 6. Proyección de los residuos sólidos 32

Tabla 7. Volumen anual del relleno sanitario con aprovechamiento por asentamiento (estimación preliminar con 20 % de material de cobertura) 33
Tabla 8. Evaluación técnica del emplazamiento actual 33
Tabla 9. Evaluación administrativa y operativa 34
Tabla 10. Comparación entre mantener el relleno sanitario en su ubicación actual y relocalizarlo 35
Tabla 11. Parámetros para el cálculo del volumen del Relleno Sanitario 37
Tabla 12. Volumen del Relleno Sanitario para 10 años con celda de confinamiento 39
Tabla 13. Análisis de sensibilidad del aprovechamiento por asentamiento 40
Tabla 14. Parámetros de compactación. 41
Tabla 15. Características geométricas de las áreas. 42
Tabla 16. Volumen requerido para el relleno sanitario 42
Tabla 17. Dimensiones de celda diaria 44
Tabla 18. Conciliación de dimensiones y material de cobertura 45
Tabla 19. Datos de drenes. 50
Tabla 20. Colector de lixiviados. 50
Tabla 21. Ecuaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia Fuente INAMHI. 52
Tabla 22. Resultados del análisis de lixiviados. 55
Tabla 23. Caracterización del lixiviado 56
Tabla 24. Dimensiones del humedal artificial 58
Tabla 25. Cálculo teórico de la capacidad hidráulica del humedal 59
Tabla 26. Características de cunetas. 61

Índice de anexos

Anexo 1. Levantamiento topográfico 75
Anexo 2. Análisis de agua 77
Anexo 3. Diseño de celda 90
Anexo 4. Planos de diseño 98
Anexo 5. Cálculos hidráulicos drenaje de lixiviados 110
Anexo 6. Cálculo geomembrana 115
Anexo 7. Manual de operaciones 118
Anexo 8. Presupuesto 141
Anexo 9. Análisis multicriterio 143

1. Introducción

El relleno sanitario de Paute enfrenta una saturación acelerada debido a la falta de separación desde la fuente, nula conciencia ciudadana y falta de recursos económicos para operatividad. Esto genera impactos negativos como riesgos ambientales con lixiviados, contaminación de suelos y económicos tales como altos costos de mantenimiento (Sáez & Urdaneta G., 2014).

La ausencia de un modelo integral limita la sostenibilidad del sistema

Entre ellos destacan:

1) Saturación prematura de celdas debido a un aumento no previsto en la generación per cápita o a una baja eficiencia en la compactación.

2) Sistema de captación y quema de biogás ineficiente, contribuyendo a emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y olores.

3) Posibles limitaciones en el presupuesto municipal para la operación óptima del sitio, mantenimiento de maquinaria y cumplimiento del plan de cierre y post-cierre. Además, una baja tasa de recuperación de materiales reciclables en fuente, aumentando el volumen dispuesto.

Además, la economía lineal de Paute que se basa en extraer- usar- desechar, es una de las principales causas del colapso del relleno sanitario, simultáneamente la falta de infraestructura para reciclaje o reutilización, la escasa preparación o capacidad operativa de los recicladores informales (Silva & Zamora, 2005)

La carencia de un marco regulatorio local que incentive a la separación domiciliaria o alianzas público-privadas no solo satura el relleno sanitario que ya cuenta con una vida útil reducida a menos de 10 años, sino que genera pérdidas económicas anuales por costos de operación (Sáez & Urdaneta G., 2014).

Sin embargo, la gestión inadecuada de los desechos se evidencia en el PDOT de Paute de 2020, en donde el diagnóstico de la situación indica que en el área rural el 49,37% de desechos se envían en el carro recolector, mientras que el 35,65% de las viviendas realizan la quema, el 11,34% deposita sus desechos en terrenos baldíos o quebradas y el 2,71% entierran los desechos sólidos y en menor porcentaje se arrojan al río, acequia o canal más cercanos.

Así mismo, en el área urbana, el carro recolector cubre el 95,11% de las viviendas, el 2,88% sigue realizando la quema de basura. Todas estas cantidades evidencian el manejo deficiente del sistema de recolección y disposición final, sumado a la falta de educación ambiental y su escasa o nula difusión en escuelas, colegios y espacios públicos.

En el Plan De Ordenamiento Territorial se da a conocer, en la fase de diagnóstico se propone “Ampliación de la cobertura del servicio de recolección de basura en el área rural”, además de “Ordenanza para el Cobro de tasa por Recolección de Basura”.

Con este contexto, se plantea alargar la vida útil del relleno sanitario optimizando la operación y expansión de este.

2. Marco teórico

2.1 Gestión integral de residuos sólidos

La Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS) consiste en un conjunto de acciones, técnicas, operativas, sociales y ambientales que contribuyen a la minimización y aprovechamiento de residuos, además de garantizar la disposición final adecuada de desechos con el objetivo de proteger la salud pública y el medio ambiente (Sáez & Urdaneta G., 2014).

El enfoque de la materia se basa en una jerarquía que prioriza la reducción en la fuente, la reutilización, reciclaje y otras formas de aprovechamiento, haciendo que la disposición final sea una alternativa (Sáez & Urdaneta G., 2014).

2.2 Relleno Sanitario

El relleno sanitario es una infraestructura de ingeniería diseñada para la disposición final de los desechos, en la cual los desechos se confinan de manera controlada en celdas, para ser compactados posteriormente y reducir su volumen, se cubren periódicamente con material inerte, además minimizan impactos ambientales y muchas veces funciona sistema de gestión empleando métodos de valoración de residuos (Ullca, 2006).

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente (MAE, 2015), un relleno sanitario es un lugar seleccionado técnicamente, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo para la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales mediante la aplicación de principios de ingeniería, que incluyan la confinación y aislamiento de los residuos en un área mínima, su compactación, cobertura diaria, control de gases y lixiviados, hasta la cobertura final.

2.2.1 Principios de funcionamiento

El funcionamiento de un relleno sanitario se basa en:

- Confinar los residuos en un área especifica
- Reducir el volumen mediante la compactación.
- Disponer de cobertura diaria, intermedia y final.
- Control de lixiviados y biogás.
- Monitoreo ambiental periódico.

2.3 Ampliación de rellenos sanitarios

La ampliación de los rellenos sanitarios garantiza una extensión de la vida útil, incorporando nuevas áreas de disposición final y optimizando espacios, por lo que este proceso requiere disponibilidad de terreno, condiciones geotécnicas apropiadas, topografía del terreno favorable, capacidad remanente y abastecimiento para la proyección de residuos (Navarro et al., 2019).

Es importante garantizar la compatibilidad de las celdas existentes con las nuevas, dado que los sistemas de drenaje pueden verse afectados al no tomar la decisión adecuada (Navarro et al., 2019).

2.4 Métodos de disposición de residuos

Para la ampliación de las celdas de confinamiento, la selección del método de vaguada depende directamente de las condiciones topográficas del terreno siendo una alternativa aplicable para la disposición final (Sáez & Urdaneta G., 2014).

2.4.1 Método de vaguada

El método de vaguada se aplica cuando el terreno presenta una depresión natural o una configuración encajada que permite disponer los residuos desde las cotas inferiores hacia las superiores. Antes de iniciar el llenado se acondiciona e impermeabiliza el fondo, se instalan los drenes de lixiviados y se separan las aguas lluvias. Los residuos se descargan en un frente reducido, se extienden en capas, se compactan y se cubren al finalizar la jornada. La superposición controlada de celdas forma terrazas escalonadas adaptadas a la topografía. Su diseño debe comprobar la estabilidad de taludes, la accesibilidad de la maquinaria y la continuidad del drenaje. (Torri, 2017)

Para la aplicación del método de vaguada es necesario considerar la estabilidad de los taludes, el adecuado manejo de las aguas superficiales y subterráneas, así como la disponibilidad de material para la cobertura diaria de los residuos. Además, se deben implementar sistemas de drenaje y control de lixiviados para evitar la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua cercanos, garantizando una operación segura y ambientalmente adecuada (Torri, 2017).

2.5 Producción y proyección de residuos

Como parte de la reingeniería del relleno sanitario es indispensable contar con los datos clave, por lo que se realiza la estimación de la cantidad de residuos generado (Sáez & Urdaneta G., 2014).

2.5.1 Producción per Cápita

La Producción Per Cápita (PPC), es un indicador de la cantidad promedio de residuos generados por habitantes en un periodo determinado, esta se mantiene constante dado que se cuenta con datos locales confiables, este puede acomodarse dependiendo de los hábitos de consumo y el crecimiento poblacional (Ricaldi et al., 2021).

Dado que la PPC es la cantidad de residuos generados por habitante por día, es un factor fundamental para el cálculo y diseño de las celdas de disposición final (Ricaldi et al., 2021).

2.5.2 Proyección poblacional

Es un proceso mediante el cual se estima el crecimiento futuro de una población a partir de datos históricos, considerando valores como mortalidad, migración, tasa de natalidad (Ricaldi et al., 2021).

La proyección poblacional obedece a las cifras de la población servida, en este caso, Paute la cobertura de servicio es el 65% según el PDOT.

2.6 Generación y manejo de lixiviados

Los lixiviados son líquidos que se generan tras la descomposición de los residuos sólidos y la infiltración de agua a través de ellos, con estos se presentan compuestos orgánicos e inorgánicos, además microorganismos. Si no son adecuadamente gestionados pueden significar un riesgo ambiental grave (Arias, 2004).

2.6.1 Características de los lixiviados

Los lixiviados presentan diferentes características dependiendo del tipo de residuos dispuestos en los rellenos y los líquidos contenidos en diferentes desechos, tienen un amplio espectro de componentes, entre ellos, materia orgánica, metales pesados, nitrógeno, fósforo y patógenos (Arias, 2004).

2.6.2 Sistemas de recolección y conducción

Los sistemas de recolección y conducción de lixiviados son el conjunto de estructuras hidráulicas diseñadas para captar, conducir y evacuar los lixiviados generados dentro del relleno sanitario, a este se le puede sumar el agua lluvia, evitando la acumulación de estos y reduciendo el riesgo de contaminación del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas (Mosquera & Lara, 2012).

Estos sistemas incluyen capas drenantes, tuberías perforadas dispuestas en configuración tipo espina de pez, colectores principales y estructuras de inspección, los cuales permiten conducir los lixiviados hacia unidades de tratamiento (Mosquera & Lara, 2012).

2.6.3 Tratamiento de lixiviados

Los rellenos sanitarios al ser una práctica muy utilizada con los sistemas de gestión de residuos sólidos presentan degradación de los desechos se obtienen subproductos líquidos que junto con la lluvia pueden llevar consigo materiales sólidos, denominándose lixiviados (Torri, 2017).

Estos se han convertido en un reto frente a su tratamiento debido a que su variabilidad en componentes contaminantes tiene un alto potencial de impactar negativamente los sistemas acuáticos cercanos (Torri, 2017).

2.7 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento diseñados para reproducir de manera controlada los procesos físicos, químicos y biológicos de un humedal natural. En un humedal de flujo subsuperficial horizontal, el lixiviado circula bajo la superficie a través de un medio poroso plantado con macrófitas. La filtración, sedimentación, adsorción y actividad microbiana asociada

al sustrato y a las raíces contribuyen a remover materia orgánica, sólidos y nutrientes. Su desempeño depende del caudal, la carga contaminante, la porosidad, la profundidad, la temperatura y el tiempo de retención hidráulica (Arias, 2004)

En el Ecuador no existe una norma específica para el tratamiento de lixiviados, para el control y monitoreo de estos líquidos se observan los valores límites permisibles del libro VI del Texto Unificado de la Legislación Secundaria Ambiental (TULSMA), De la Calidad Ambiental/Título IV, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua/ Numeral 4.1.2: Criterios de calidad de aguas para la preservación de flora y fauna de aguas dulces frías o cálidas, e en aguas marinas y de estuarios; así como también el Numeral 4.2.1: Normas generales para descarga de efluentes, tanto al sistema de alcantarillado, como a los cuerpos de agua.

Los humedales artificiales tienen el propósito de reducir las cargas contaminantes presentes en el lixiviado y en las aguas servidas generadas en el área administrativa, previo a su vertido en fuentes hídricas cumpliendo la normativa indicada (Arias, 2004).

Los humedales artificiales se consideran un sistema de tratamiento natural, a través de procesos físicos, químicos y biológicos que mejoran la calidad del agua residual. Los costos de construcción de estos sistemas pueden ser semejantes a los tratamientos tradicionales, no reflejan lo mismo en costos de operatividad. Resultan ser más rentables y ecológicamente racionales con el tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios (Mosquera & Lara, 2012).

2.8 Manejo de biogás

El biogás es una mezcla de gases generada por la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos sólidos. Está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de pequeñas cantidades de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Espejo, 2018).

El manejo del biogás tiene un conjunto de sistemas y procesos destinados a controlar, recolectar, conducir y disponer o aprovechar este gas, con el fin de minimizar impactos ambientales y riesgos a la salud (Espejo, 2018).

2.9 Diseño de celdas y terrazas

Una celda diaria es la unidad operativa formada por los residuos recibidos durante una jornada, extendidos y compactados dentro de una geometría definida y cubiertos al terminar el día (Navarro et al., 2019). Una terraza es una plataforma o nivel de mayor escala, conformada por la sucesión de varias celdas y franjas de trabajo. En terrenos en vaguada, las terrazas se disponen escalonadamente para adaptarse a la topografía, controlar la altura de los taludes y mantener el acceso, el drenaje y la estabilidad (Navarro et al., 2019).

El diseño de celdas y terrazas es un proceso por el cual se organizan espacial y operativamente la disposición de los residuos sólidos dentro del relleno, además, representan unidades básicas de disposición mientras que las terrazas corresponden a un modelo escalonado adaptado a la

topografía del terreno, especialmente en los que se han aplicado el método de vaguada (Navarro et al., 2019).

En rellenos sanitarios que están próximos a ampliarse se recomienda que mediante el método de vaguada las celdas formen terrazas que se adapten al terreno, dependiendo de la topografía (Navarro et al., 2019).

Para el diseño de estas se toma en cuenta la altura de las capas, pendientes, estabilidad de taludes, sistemas de drenaje y accesos operativos. Dado que el terreno puede tener irregularidades se pueden manejar como valores promedio (Navarro et al., 2019).

2.10 Impactos ambientales y medidas de mitigación

Los impactos ambientales sobre el suelo, agua, aire y el entorno social están principalmente vinculados con la generación de lixiviados, emisiones de biogás, proliferación de vectores y alteración del paisaje. Mediante la implementación de medidas de mitigación como drenaje de lixiviados, captación de biogás, cobertura adecuada de residuos, control de escorrentías, es posible minimizar los impactos, garantizando una gestión ambiental adecuada y sostenible (Chambillo, 2017).

2.11 Selección para nuevos espacios en rellenos sanitarios

Existe un efecto denominado “Not in my backyard” o en español que significa “No en mi patio trasero”, Esto hace referencia a los desechos depositados en lugares cercanos a zonas residenciales generando conflictos socioambientales dado que la población tiende a rechazar posibles impactos directos tanto en la salud como el ambiente, sea este el suelo, aire o fuentes hídricas (Duque et al., 2004).

El análisis multicriterio se basa en el método de Delphi, que sirve para seleccionar criterios importantes dándoles una ponderación que tras ser multiplicado por calificaciones se obtiene una ponderación numérica. Dichos criterios son seleccionados dependiendo las normativas propias del país (Duque et al., 2004).

Esto implica que se deba escoger el mejor criterio o alternativa y asumir las consecuencias, a través de los procedimientos basados en SIG (Sistemas de Información Geográfica).

2.12 Análisis multicriterio

Mas allá de utilidades básicas, uno de los usos fundamentales de los Sistemas de Información Geográfica es la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles. Para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de algebra de mapas, el cual incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas ráster de entrada para producir una o varias capas ráster de salida. Por operador se entiende un algoritmo que realiza una misma operación en todas las celdillas de una capa ráster (Duque et al., 2004).

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta de reingeniería para ampliar y optimizar el relleno sanitario del cantón Paute, mediante el diagnóstico técnico-operativo y el diseño básico de las celdas y terrazas, el drenaje y tratamiento de lixiviados, el manejo de biogás y las obras complementarias.

3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar técnicamente la estructura actual del relleno sanitario de Paute, evaluando el estado operativo y técnico, mediante visitas de campo, revisión documental y monitoreo básico existente.
- Identificar y valorar los principales riesgos técnicos asociados al actual sistema de disposición final, diferenciando causas estructurales y operativas.
- Evaluar la viabilidad técnica y administrativa de mantener el relleno en su ubicación actual, comparándola con la posibilidad de relocalización mediante criterios multicriterio (técnicos, ambientales, sociales y económicos), sin llegar al nivel de estudios de ingeniería.
- Proponer y priorizar alternativas técnicas de mejora para la gestión y control de impactos, orientadas a prolongar la vida útil del sitio en el corto y mediano plazo, considerando estándares nacionales y buenas prácticas.

4. Diagnóstico

4.1 Descripción de la zona de estudio

El relleno Sanitario de Paute se ubica en la parroquia San Cristóbal, del Cantón Paute, provincia del Azuay. Con coordenadas UTM 746823.40 m E; 9688053.40 m S. Como se indica en la Ilustración 1 e ilustración 2.

Ilustración 1. Mapa de ubicación

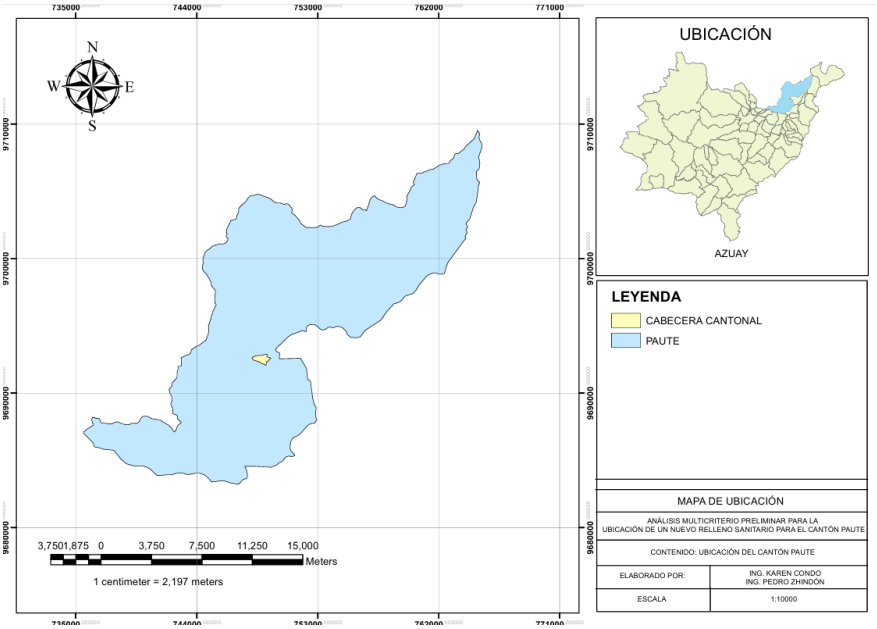


Ilustración 2. Ubicación del relleno sanitario



El área total de terreno bordea las 7 hectáreas, con una capacidad diseñada para albergar 12 ton diarias de desechos, se encuentra a 5.03km del centro urbano de Paute.

El clima de la zona varía entre los 15 y 25 grados, siendo parte de la cordillera oriental, con una precipitación anual media entre 500 mm y 2000 mm anuales, siendo este un factor crítico para la generación de lixiviados.

Tras la visita técnica realizada se evidenció que el terreno presenta pendientes altas, superiores al 40 %, en los sectores periféricos, excepto en la zona central, que tiene un área aproximada de 3 ha, en la cual se efectuaron movimientos de tierra (cortes) para excavar una trinchera y conformar una plataforma sobre ella. Según la información proporcionada por el técnico de gestión ambiental del GAD Municipal de Paute, la trinchera ha completado su vida útil y la plataforma conformada sobre ella se encuentra aproximadamente al 90 % de su capacidad; este porcentaje es una estimación operativa, dado que el relleno no dispone de registros de pesaje ni de control topográfico (Tabla 3). Sobre esta zona intervenida se conformaron las tres terrazas existentes (ilustraciones 6 y 12), que constituyen el área de ampliación de 7,856.23 m² analizada en la sección 5.7.

Tras la inspección realizada se ha observado que no existen fuentes de agua superficial cercana, tampoco afloramiento de aguas subterráneas.

Atiende a una población aproximada de 23.106 habitantes según registros del INEC.

Para efectos del estudio se utilizará la población de 30,398 habitantes, lo indicado en el PDOT, se asume esta población dado que el archivo oficial del municipio es un estudio más cercano a la realidad del cantón.

Es operado de manera directa por el GAD Municipal de Paute a través del departamento de Gestión Ambiental.

4.2 Generación de Residuos Sólidos

La población de Paute tiene una población aproximada de 30,398 habitantes según el PDOT 2020. Donde la mayor parte del territorio corresponde al área rural, con un 78.31% total de residentes. El último es un dato crucial dentro de la generación ya que, la logística de recolección de desechos y la composición de los residuos con mayor carga de orgánicos se ven altamente afectadas por esta distribución.

La población urbana genera la mayor cantidad de residuos heterogéneos, teniendo esta un total de 5.014 habitantes. La generación de estos de mide como producción per cápita (PPC), dando resultado a kilos de basura por persona por día.

Según estudios realizados por el Municipio de Paute, se evidencia una PPC estimada de 0.51 kg/habitante/día. Esto significa que cada persona produce cerca de 510 gramos de basura al día.

De acuerdo con la información proporcionada por el GAD Municipal de Paute, se estima que al relleno sanitario ingresan, en promedio, 10,07 toneladas de residuos sólidos por día.

4.3 Caracterización de residuos sólidos del Cantón Paute

Como parte del diagnóstico de la gestión integral de residuos sólidos del cantón Paute, se consideró la caracterización de residuos realizada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Paute, la cual constituye la información técnica disponible sobre la composición de los residuos sólidos municipales.

De acuerdo con dicho estudio, la caracterización se efectuó sobre una muestra con un peso total de 991,70 kg, identificándose la participación porcentual de las diferentes fracciones que conforman los residuos sólidos generados en el cantón.

La información presentada evidencia que la fracción orgánica corresponde al 70 % del total de la muestra (697,03 kg), constituyéndose en el componente predominante. En menor proporción se identifican residuos de papel higiénico (11 %), fundas plásticas (7 %), papel y cartón (5 %), botellas plásticas (3 %), vidrio (2 %), así como latas y telas, cada una con una participación del 1 %.

Estos datos permiten conocer la composición de los residuos que ingresan al sistema de gestión del cantón y constituyen un insumo para evaluar las condiciones de operación del relleno sanitario, así como el potencial de implementación de estrategias de aprovechamiento, reciclaje y valorización de residuos.

4.4 Incidencia de la composición de los residuos sólidos en la gestión del relleno sanitario

La composición de los residuos sólidos del cantón Paute influye directamente en la operación del relleno sanitario. El predominio de la fracción orgánica (70 %) favorece la generación de lixiviados y biogás como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica, por lo que resulta indispensable mantener un adecuado sistema de drenaje, captación y manejo de estos subproductos para prevenir impactos ambientales.

Por otra parte, la presencia de materiales reciclables, como papel y cartón, plásticos, vidrio y metales, evidencia la existencia de residuos con potencial de aprovechamiento que, mediante programas de separación en la fuente y recuperación, podrían disminuir el volumen de residuos destinados a disposición final. Esto contribuiría a optimizar la capacidad operativa del relleno sanitario y prolongar su vida útil.

4.5 Estado actual del relleno sanitario- Descripción general

El relleno sanitario de Paute se encuentra en fase operativa activa, dispone de celdas en las cuales los residuos sólidos urbanos son depositados, extendidos y con un bajo nivel de compactación dado que la maquinaria que se encuentra en el sitio no es adecuada para esta actividad.

El relleno sanitario cuenta con:

- Geomembrana para impermeabilización de fondo
- Red de drenaje de lixiviados
- Humedales Artificiales
- Vías internas de acceso
- Zona de descarga y frente de trabajo.

Actualmente, en el relleno sanitario de Paute no se realiza un proceso técnico y controlado de compactación de los residuos sólidos. La maquinaria disponible se utiliza principalmente para mover y extender los residuos, sin conformar capas uniformes, sin establecer un número definido de pasadas y sin efectuar controles de densidad. En consecuencia, no es posible determinar la densidad alcanzada ni establecer un porcentaje de compactación correspondiente a las condiciones actuales de operación.

Como preselección se recomienda una excavadora sobre orugas de aproximadamente 20 a 23 t, con zapatas triple garra de 600 mm. Como referencia, una excavadora John Deere 210 P-Tier con zapata de 600 mm presenta una presión nominal de contacto de 44,4 a 45,7 kPa; las opciones de 700 y 800 mm reducen la presión a aproximadamente 39 y 34 kPa, respectivamente. Por esta razón, la zapata de 600 mm ofrece mayor presión de contacto para el reacomodo de los residuos, sin sustituir a un compactador sanitario. La selección final debe comprobar estabilidad, transitabilidad y disponibilidad local.

La operación con maquinaria en el relleno sanitario se puede observar en la ilustración 3.

Ilustración 3. Operación con maquinaria en el relleno sanitario.



Durante la inspección de campo se evidenció que la cobertura diaria de los residuos no presenta un espesor uniforme, debido a la inexistencia de un control durante su aplicación. Se observaron espesores variables de aproximadamente 0,10 m, 0,25 m y 0,38 m, lo que refleja una ejecución heterogénea de esta actividad operativa. Esta situación incrementa el riesgo de emisión de olores, proliferación de vectores y dispersión de residuos ligeros por efecto del viento, comprometiendo las condiciones sanitarias y ambientales del relleno sanitario.

Durante la inspección no se identificó una celda diaria con ancho, altura, longitud y pendiente estandarizados; únicamente se observaron espesores variables de cobertura. Para la

reingeniería se propone definir la celda mediante el ancho del frente, la altura de la capa, la pendiente de la rampa y la longitud requerida para recibir la masa de diseño. Su dimensionamiento definitivo se presenta en la sección 5.8, una vez conciliado el volumen geométrico con la recepción diaria.

A continuación, en la ilustración 4 se muestra la situación actual del relleno sanitario.

Ilustración 4. Situación actual del relleno sanitario



Durante la visita técnica se verificó que el sistema de drenaje y conducción de lixiviados se encuentra operativo. El personal del GAD Municipal de Paute indicó que la tubería corrugada de 160 mm presenta problemas para evacuar los líquidos de las celdas; sin embargo, de acuerdo con el cálculo hidráulico de la sección 5.9.3, un diámetro interior de 160 mm es suficiente para los ramales secundarios. Por tanto, la deficiencia observada no se atribuye a la capacidad hidráulica de la tubería, sino que podría deberse a la colmatación u obstrucción de la tubería y del material de dren, condición que deberá verificarse mediante inspección. Para la ampliación se propone un dren principal de 200 mm de diámetro interior y ramales secundarios de 160 mm (sección 5.9), con el fin de evitar acumulaciones e infiltraciones al suelo.

En la ilustración 5, se expone la presencia de vectores.

Ilustración 5. Presencia de vectores.



Con base en la inspección de campo y en la revisión de la información proporcionada por el GAD Municipal de Paute, se determina que el relleno sanitario se encuentra en operación y dispone de infraestructura básica, entre ella vías internas, geomembrana de impermeabilización, drenaje de lixiviados, humedales artificiales y chimeneas para la evacuación de biogás.

No obstante, se identificaron deficiencias en la operación, entre ellas la ausencia de compactación técnica, la aplicación irregular del material de cobertura, la falta de pesaje y registros diarios, la disponibilidad limitada de maquinaria, la presencia de vectores y la inexistencia de medición, quema o aprovechamiento del biogás. Además, el manejo de lixiviados requiere evaluación y optimización debido al incumplimiento de DBO_5 y DQO en el efluente analizado. Por tanto, el sitio no se encuentra abandonado, pero necesita una intervención integral para mejorar sus condiciones técnicas, sanitarias, ambientales y administrativas.

4.6 Generación per cápita y total diaria de residuos

Con base en la información técnica proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Paute, la generación per cápita de residuos sólidos utilizada para la operación del relleno sanitario es de 0,51 kg/hab/día. Este valor es el parámetro de referencia para estimar la cantidad de residuos generados por la población atendida y para la planificación de las actividades de recolección, transporte y disposición final.

4.7 Densidad de los residuos sólidos

La densidad de los residuos sólidos es un parámetro para evaluar la eficiencia de la disposición final y estimar la vida útil de un relleno sanitario. A partir de la composición de los residuos es posible obtener una densidad teórica; sin embargo, la determinación de la densidad real en el relleno sanitario del cantón Paute no fue posible, debido a las condiciones actuales de operación. Durante la inspección de campo se evidenció la ausencia de un control adecuado en la disposición final de los residuos, así como la falta de un seguimiento sistemático a las actividades de compactación y conformación de las celdas. Adicionalmente, la inexistencia de procesos de separación y registro de los residuos dispuestos impide contar con información confiable para determinar la densidad alcanzada en el sitio. Por lo que, no fue posible establecer la densidad real de los residuos en el relleno sanitario, limitando la evaluación de la eficacia del proceso de compactación y de la capacidad efectiva de disposición.

4.8 Geología de la zona de estudio

El análisis geotécnico corresponde a los suelos y materiales de relleno investigados en el estudio del emplazamiento; no representan las propiedades mecánicas de los residuos sólidos municipales, además, es un componente fundamental para el diseño de celdas de disposición final de residuos sólidos, ya que permite evaluar las condiciones del suelo de fundación, su comportamiento mecánico e hidráulico, así como la estabilidad de los taludes bajo condiciones estáticas y sísmicas.

4.8.1 Parámetros geotécnicos empleados en el análisis de estabilidad de taludes

Para el análisis geotécnico del terreno correspondiente al área de estudio se consideraron los resultados obtenidos mediante ensayos de laboratorio incluidos en el estudio geotécnico del proyecto de gestión integral de los desechos sólidos de la ciudad de Paute. Entre los ensayos realizados se encuentra el ensayo triaxial no consolidado–no drenado (UU), mediante el cual se determinaron los principales parámetros asociados al comportamiento resistente del suelo.

Los resultados obtenidos para la muestra analizada a una profundidad de 1,00 m establecen un peso unitario húmedo de 1,66 g/cm³, un ángulo de fricción interna de 17,6° y una cohesión de 4,00 t/m². Estos parámetros fueron determinados a partir de la interpretación de los esfuerzos obtenidos durante el ensayo triaxial y de los correspondientes círculos de Mohr.

Los resultados del ensayo triaxial se presentan en la Tabla 1 únicamente como referencia. Para el análisis de estabilidad se adoptaron los valores recomendados para diseño por el mismo estudio (γ = 1,70 t/m³; c = 3,00 t/m²; φ = 18°), según se justifica en la sección 5.1.4.7 (Tabla 5):

Tabla 1. Resultados del ensayo triaxial UU, muestra B-1 a 1,00 m (referencia).

Parámetro	Símbolo	Valor de referencia	Unidad
Peso unitario	γ	1,66	t/m³
Cohesión	c	4,00	t/m²
Ángulo de fricción	φ	17,6	°

El ensayo triaxial caracteriza una muestra puntual, mientras que el informe principal establece un conjunto de parámetros para diseño. En esta investigación se utiliza este último para representar el suelo de fundación, manteniendo la coherencia entre el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción adoptados en la Tabla 5 y en el análisis de la sección 5.13.

Es importante indicar que los resultados geotécnicos deben interpretarse considerando que la investigación se fundamentó en sondeos puntuales. El propio estudio recomienda verificar las condiciones del subsuelo durante la ejecución de excavaciones mediante inspección geotécnica, debido a la posible variabilidad espacial de las propiedades del terreno.

4.9 Análisis de la calidad de agua que sale del relleno sanitario

En el relleno sanitario del cantón Paute, la evaluación de la calidad del agua residual generada evidencia la necesidad de replantear el sistema de tratamiento de lixiviados, especialmente considerando la proyección de una nueva celda de disposición final.

La evaluación de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos permitió identificar un comportamiento diferenciado entre los parámetros analizados. Mientras algunos se mantienen

dentro de los límites máximos permisibles establecidos en el Anexo 1 del TULSMA, otros presentan excedencias respecto a la normativa, lo que evidencia limitaciones en el desempeño del sistema actual de tratamiento y justifica la necesidad de optimizar su funcionamiento.

En la tabla 2, se exponen los resultados del análisis de calidad de agua de lixiviados. Los principales resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 2. Resultados del análisis de calidad de agua de lixiviados.

Parámetros	Resultados
pH	8,10 (dentro del rango permisible de 6 a 9).
Sólidos suspendidos totales	70,4 mg/L (cumple con la normativa).
DBO_5	146,22 mg/L (no cumple; límite permisible 100 mg/L).
DQO	392,02 mg/L (no cumple; límite permisible 200 mg/L).
Coliformes fecales	130 NMP/100 mL (cumple).
Fósforo total	6,38 mg/L (cumple).
Sulfatos	104,72 mg/L (cumple).
Grasas y aceites	< 20 mg/L (cumple).
Nitrógeno total Kjeldahl E	< 25,0 mg/L (cumple).

Los parámetros DBO_5 y DQO reflejan la presencia de carga orgánica característica de los lixiviados generados en el proceso de disposición final de residuos. En cuanto al Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), se obtuvo un valor de < 25,0 mg/L, evidenciando una baja concentración de nitrógeno orgánico y amoniacal en el lixiviado analizado. De acuerdo con la normativa ambiental aplicable, este parámetro se encuentra dentro de los límites máximos permisibles. Estos resultados respaldan la importancia de mantener y optimizar los procesos de tratamiento implementados, a fin de asegurar un manejo técnico adecuado dentro del sistema de gestión del relleno sanitario.

4.10 Procesos de tratamiento

Los lixiviados generados en las celdas del relleno sanitario son captados mediante un sistema de drenaje compuesto por tuberías perforadas instaladas sobre una capa de material granular, las cuales conducen el líquido hacia un colector principal que transporta el flujo hacia el sistema de tratamiento.

Posteriormente, los lixiviados son conducidos hacia una poza de ecualización donde se regula el caudal y se homogeniza la carga contaminante, permitiendo la sedimentación de sólidos suspendidos y la reducción inicial de materia orgánica.

Desde la poza de ecualización, el lixiviado pasa a una estructura de distribución que reparte el caudal en el humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal. Después del tratamiento en el lecho plantado, el efluente se conduce a la laguna de pulimiento y finalmente al punto de descarga.

4.11 Datos generales

En la tabla 3, se exponen datos generales del sistema de gestión de residuos sólidos del Municipio de Paute.

Tabla 3. Datos generales

Aspecto	Descripción	Fuente de Información
Proceso Operativo	En el proceso operativo no se evidencia un pesaje, ya que el relleno no cuenta con báscula, la descarga se realiza en un solo lugar, no existe una extensión definida técnicamente para esparcimiento de residuos, no existe una compactación por el momento ya que, la maquinaria que se usa en el relleno la maneja obras públicas, por lo cual no se tiene un registro único de funcionamiento u operatividad, la cobertura muchas veces se realiza con material de desalojo que se recibe dentro del relleno o se mina el talud que se encuentra frente al relleno	Los datos han sido obtenidos mediante observación directa y con entrevistas al responsable del relleno sanitario que es el técnico de gestión ambiental.
Equipamiento	No existe un sistema de bombeo definido porque cuenta con pendiente favorable, la maquinaria suele ser una retroexcavadora que opera ciertos días del mes cuando se encuentra disponible, no existe un compactador ni	Inventario Municipal/ Contrato de compra mantenimiento

	cisterna para lixiviados. Existen dos camiones recolectores.	
Cantidades/ Estadísticas	No existe un registro de toneladas recibidas por día, mes o año en al menos 5 años. La tasa de generación per cápita no ha sido medida en los últimos 3 años.	No existen libros de entrada, guías o registros de pesaje. Tampoco se encuentra esta información en informes anuales.
Composición de Residuos	No existen informes de caracterizaciones realizadas desde el año 2019	N/A
Manejo de Lixiviados	La captación de lixiviados se efectúa mediante un sistema de drenaje tipo espina de pescado, integrado por un colector principal y ramales secundarios de tuberías perforadas, rodeadas por una capa de material de dren, que favorece la recolección y el flujo de los lixiviados. Todo el sistema se encuentra dispuesto sobre una geomembrana impermeable, cuya función es impedir la infiltración del lixiviado al subsuelo. Finalmente, los lixiviados son conducidos hacia un sistema de tratamiento mediante humedales artificiales.	Según el Informe de resultados de ACLAB, realizado en 2025, en el análisis de la calidad de agua del relleno sanitario, comparado con los Límites Máximos Permisibles, el DBO5 y DQO son dos parámetros que no cumplen, teniendo una carga orgánica contaminante alta.
Manejo de biogás	No existe ningún método de medición ni quema de gases. Se usan chimeneas para la conducción de estos.	Observación realizada en campo.
Documentos Normativos	Permiso Ambiental de Operación (PAO) emitido por la Autoridad Ambiental. Plan de Cierre y Post-cierre.	Ministerio del Ambiente y Energía.

Costos		Partida presupuestaria anual/semestral

5. Resultados

5.1 Diseño de la celda

5.1.1 Levantamiento topográfico

En el Anexo 1, se presenta el levantamiento topográfico del terreno de propiedad del GAD Municipal del cantón Paute. Por requerimientos de diseño, las curvas de nivel se han dibujado cada metro.

En la ilustración 6, se expone una fotografía aérea del relleno sanitario de paute.

Ilustración 6. Fotografía aérea



5.1.1.1 Evaluación técnica de las pendientes del terreno

El terreno del relleno sanitario presenta una configuración topográfica heterogénea. Las pendientes superiores al 40 % se concentran principalmente en los sectores periféricos y en los taludes naturales, por lo que no representan la condición de toda el área disponible. En la zona central existe una plataforma de aproximadamente 3 ha que fue modificada mediante

movimientos de tierra y presenta condiciones más favorables para la operación y la posible ampliación.

La información disponible permite reconocer visualmente estas diferencias; sin embargo, la tesis no incorpora una clasificación cuantitativa de la superficie por rangos de pendiente. Por esta razón, no se puede afirmar que todo el predio presente pendientes mayores al 40 % ni establecer el porcentaje exacto del terreno que se encuentra en esa condición. Las áreas con pendientes pronunciadas deberán mantenerse fuera del frente de disposición o someterse a diseños específicos de estabilización, mientras que el uso de la plataforma central deberá verificarse mediante el análisis de estabilidad correspondiente.

Para completar esta evaluación se recomienda generar un mapa de pendientes con los rangos de 0 a 10 %, 10 a 20 %, 20 a 40 % y mayor al 40 %, indicando la superficie y el porcentaje ocupado por cada categoría.

5.1.2 Generación per cápita y total diaria de residuos

Con los datos de la población actual en Paute se obtiene:

- Generación per cápita de = 0.51 kg/hab/día
- Población= 30,398 habitantes

Un total de 10.07 toneladas por día.

Cabe recalcar que no todo el cantón paute tiene cobertura del servicio de recolección, por lo que se estima un 65% de servicio brindado. Con fines operativos del relleno sanitario se toma un total de 10.07 toneladas diarias de recolección en promedio. Dato determinado previamente por el Municipio de Paute.

Esta estimación permite tener un dato más realista en cuanto a la carga diaria manejada por el sistema.

5.1.3 Composición física de los residuos sólidos de disposición final

En la tabla 4, se expone la composición física de los residuos de disposición final, caracterización realizada por la municipalidad de Paute.

Tabla 4. Composición física de los residuos de disposición final

Residuos	Peso Total	Porcentaje%
Orgánicos	697.03	70%
Papel y cartón	52.69	5%
Papel higiénico	110.63	11%
Fundas	69.03	7%
Botellas plásticas	28.31	3%

Latas	7.47	1%
Telas	6.34	1%
Vidrios	20.2	2%
Total	**991.7**	**100%**

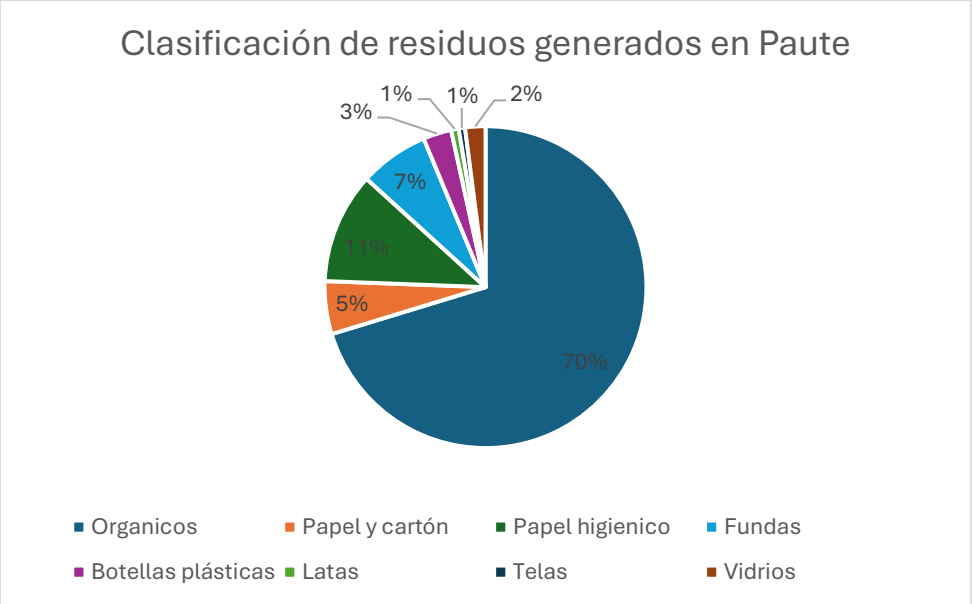
Tomada de la caracterización realizada por la municipalidad de Paute

En el cantón Paute la composición física de los residuos está altamente influenciada por las actividades domésticas, consumo de alimentos frescos, actividades agrícolas, bajo nivel de separación de residuos en la fuente y la condición semiurbana-rural del cantón.

A esto se suma la escasa difusión de conciencia ambiental.

En la ilustración 7, se expone la clasificación de residuos generados en el cantón Paute.

Ilustración 7. Clasificación de residuos generados en Paute.



Esta composición condiciona el diseño y la operación del relleno sanitario y constituye un elemento clave para la planificación de estrategias de manejo sostenible de residuos.

5.1.4 Caracterización de los suelos del relleno sanitario

En el año 2021 la Municipalidad de Paute realiza un proceso de contratación No 004-AGADMCP-202, el objeto del contrato es: ***"ANÁLISIS DE LABORATORIO DE SUELOS PARA EL EMPLAZAMIENTO DE UN ESPACIO CUBIERTO EN EL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN PAUTE."***

El estudio se desarrolló mediante trabajos de campo, ensayos de laboratorio y modelaciones geotécnicas, de acuerdo con las normas ASTM y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), dichos resultados se exponen en la continuación del presente apartado.

En dicho proceso de contratación se contrató el análisis de laboratorio de suelos del cual se obtuvieron los siguientes resultados:

5.1.4.1 Análisis geotécnico del sitio

Se ejecutaron ocho sondeos de penetración estándar (SPT), con profundidades comprendidas entre 4,50 m y 6,50 m, distribuidos estratégicamente en el área destinada al emplazamiento de las celdas del relleno sanitario. La investigación permitió caracterizar el perfil estratigráfico superficial del terreno, constituido predominantemente por suelos finos de origen residual y/o coluvial, acordes con la geología local del sector.

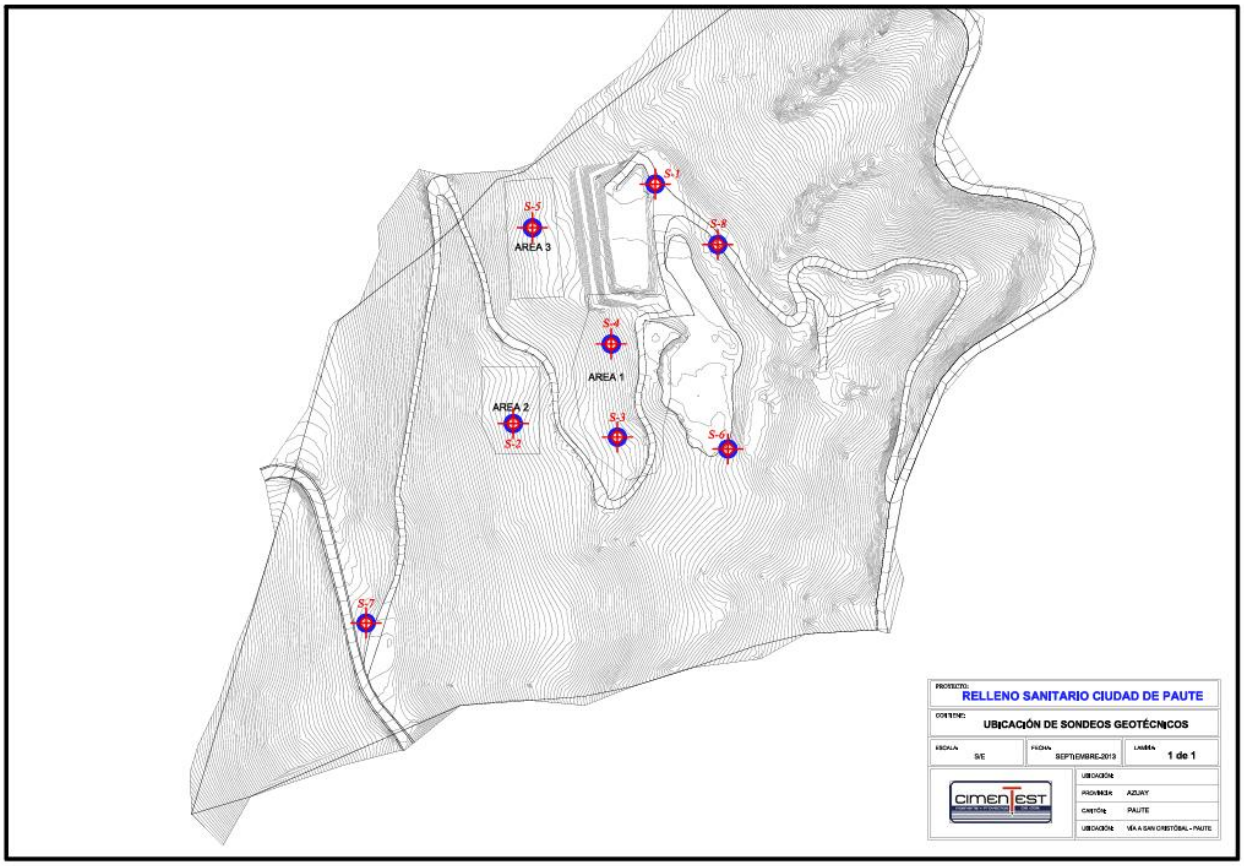
Los sondeos permitieron definir la estratigrafía superficial del terreno, identificándose una secuencia conformada por materiales de relleno. En la parte superior se reconocieron estratos de relleno granular tipo lastre, de baja plasticidad y con espesores variables, mientras que en profundidad predominan rellenos constituidos por suelos finos, principalmente arcillas de media a alta plasticidad (CL–CH), limos de alta plasticidad (MH), limos arenosos (ML) y suelos areno-arcillosos (SC), mezclados localmente con residuos antrópicos y con un grado de compactación variable, presentando en general una consistencia entre blanda y media. Estas características evidencian la heterogeneidad del subsuelo y son representativas de un terreno conformado por materiales de relleno, aspecto que debe considerarse para el diseño y operación de las obras proyectadas.

Durante la ejecución de los sondeos no se observó afloramiento ni ingreso de agua en las perforaciones hasta la profundidad investigada. Sin embargo, esta observación corresponde únicamente a las condiciones registradas durante la campaña de exploración y no permite establecer la ausencia de un nivel freático, ya que este puede encontrarse a mayor profundidad o presentar variaciones asociadas a las condiciones hidrogeológicas y estacionales del sitio.

Las muestras recuperadas fueron clasificadas mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), identificándose predominantemente arcillas de media a alta plasticidad (CL–CH), limos de alta plasticidad (MH), limos arenosos (ML), suelos areno-arcillosos (SC) y, en los estratos superficiales, materiales granulares tipo SM correspondientes a rellenos de lastre. Esta clasificación permitió establecer las propiedades geotécnicas básicas del subsuelo para la evaluación de la aptitud del terreno y el diseño de las obras proyectadas.

En la ilustración 8, se indica el mapa de sectorización del estudio geotécnico.

Ilustración 8. Mapa de sectorización



5.1.4.2 Características físicas y mecánicas del suelo

La información estratigráfica describe condiciones variables según el tipo y la profundidad del material investigado. Los parámetros de resistencia del suelo aportan antecedentes para el análisis de la fundación y de las obras asociadas, pero no caracterizan por sí solos la masa de residuos existente. La capacidad de apoyo de la ampliación requiere una evaluación específica del conjunto de materiales y de las cargas previstas.

Estos antecedentes aportan criterios para plantear la geometría de las celdas. La estabilidad de la ampliación debe comprobarse con parámetros representativos de los residuos y de la fundación, considerando las cargas y las condiciones hidráulicas del sitio.

5.1.4.3 Permeabilidad del suelo

Se realizaron cuatro ensayos de permeabilidad en campo, obteniéndose valores que oscilan entre 0,0688 cm/s y 0,0000097 cm/s, evidenciando una variabilidad hidráulica del terreno. Los estratos arcillosos profundos presentan baja permeabilidad, lo cual no sustituye la necesidad de un sistema de impermeabilización artificial en el diseño de la celda.

5.1.4.4 Análisis de estabilidad de taludes

Como antecedente, el estudio geotécnico resumido en este apartado reporta un análisis mediante el Método de los Elementos Finitos para un talud con inclinación 2H:1V, considerando

las propiedades resistentes del suelo y la acción sísmica. Los factores de seguridad consignados a continuación corresponden a dicho antecedente y no a la configuración teórica de la ampliación desarrollada en la sección 5.13:

- Condición estática (sin sismo): FS = 1,41
- Condición sísmica: FS = 1,04

Estos valores son antecedentes del estudio del suelo y deben interpretarse con los criterios, la geometría y las condiciones de carga de ese informe. No permiten demostrar la estabilidad de las terrazas proyectadas sobre residuos antiguos. En particular, el valor estático de 1,41 no alcanza el criterio de comparación FS ≥ 1,50 adoptado en la sección 5.13; se requiere una verificación específica de la ampliación y de sus condiciones sísmicas antes de establecer su cumplimiento.

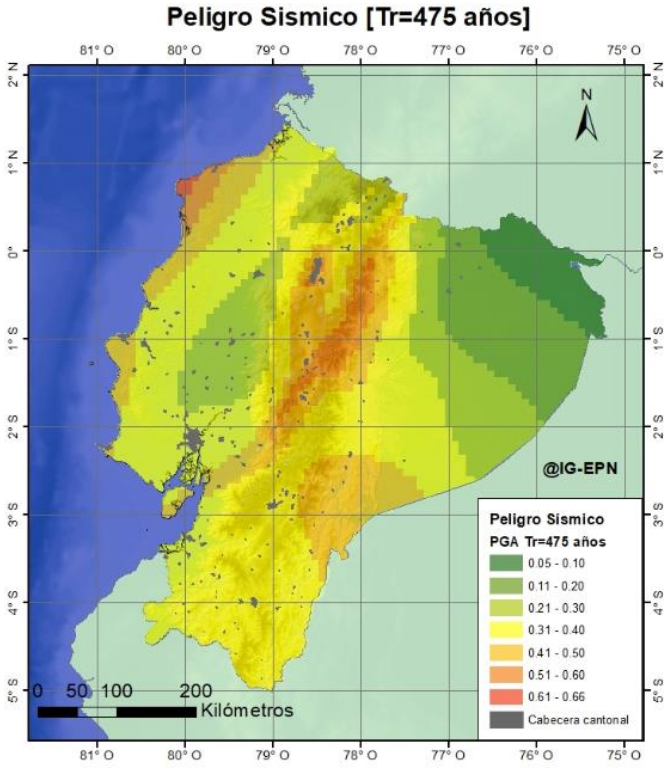
5.1.4.5 Condiciones sísmicas del sitio

De acuerdo con la NEC, el área de estudio se encuentra en zona sísmica II, con una aceleración máxima efectiva en roca de 0,25 g. Para el análisis geotécnico se adoptaron coeficientes de aceleración de 0,125 g en sentido horizontal y 0,0625 g en sentido vertical, parámetros que deben considerarse en el diseño de taludes, sistemas de drenaje y conformación de la celda.

En la ilustración 9, se expone el mapa de peligro sísmico.

Ilustración 9. Mapa de Peligro Sísmico

Instituto Geofísico



Mapa de peligro sísmico para un periodo de retorno de 475 años.

5.1.4.6 Implicaciones para el diseño de una nueva celda

Con base en los resultados del análisis geotécnico, el diseño de una nueva celda para el relleno sanitario del cantón Paute debe considerar los siguientes criterios técnicos:

- Uso de taludes con inclinación no mayor a 2H:1V como criterio geométrico de diseño, sujeto a comprobación mediante análisis de estabilidad.
- Implementación obligatoria de un sistema de impermeabilización (geomembrana HDPE), complementado por la baja permeabilidad natural del suelo soporte.
- Adecuada compactación del suelo de fundación y del material de cobertura, utilizando material proveniente de los cortes del propio sitio
- Consideración de los parámetros sísmicos en todos los análisis de estabilidad y drenaje.

5.1.4.7 Conclusiones del análisis geotécnico

La información geotécnica permite establecer antecedentes sobre el suelo de fundación y criterios para formular la ampliación. Sin embargo, las características del suelo natural no demuestran la estabilidad del relleno antiguo ni de las nuevas terrazas. La sección 5.13 presenta un análisis teórico cuya validación requiere investigar los residuos, verificar la geometría, evaluar las condiciones de lixiviados y efectuar los cálculos de estabilidad correspondientes.

Para el desarrollo del análisis de estabilidad se utilizaron los parámetros geotécnicos reportados por CIMENTEST Ingeniería y Proyectos Cía. Ltda. en septiembre de 2013, en el Estudio de mecánica de suelos para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos de la ciudad de Paute, proyecto PRO-CIM-007.1.

El informe contiene dos juegos de resultados. El ensayo triaxial no consolidado y no drenado de la muestra B-1, obtenida a 1,00 m de profundidad, reporta un peso unitario de 1,66 t/m³, un ángulo de fricción interna de 17,6° y una cohesión de 4,00 t/m². Por otra parte, el cuerpo principal del informe recomienda para diseño un peso específico de 1,70 t/m³, una cohesión de 3,00 t/m² y un ángulo de fricción interna de 18°.

En esta investigación se adopta el conjunto recomendado para diseño en el informe principal. Los parámetros se aplican al suelo de fundación y se diferencian de las hipótesis empleadas para los residuos sólidos, cuya justificación se desarrolla en la sección 5.13.

Tabla 5. Parámetros del suelo adoptados para el análisis

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Peso específico	γ	1,70	t/m³	Recomendación de diseño
Cohesión	c	3,00	t/m²	Recomendación de diseño
Ángulo de fricción interna	φ	18	°	Recomendación de diseño

Los valores del ensayo triaxial (γ = 1,66 t/m³; c = 4,00 t/m²; φ = 17,6°) se mantienen solo como referencia comparativa (Tabla 1) y no se combinan con los parámetros adoptados. Expresados

en unidades del Sistema Internacional, los parámetros adoptados equivalen a γ = 16,7 kN/m³, c = 29,4 kPa y φ = 18°, valores empleados en el modelo de estabilidad del relleno sanitario de la sección 5.13.

5.2 Análisis de la calidad de agua que sale del relleno sanitario

5.2.1 Descripción del estudio de calidad de agua

El estudio de calidad de agua fue ejecutado por un laboratorio acreditado bajo la norma NTE INEN ISO/IEC 17025, mediante muestreo de agua residual en el punto identificado como AR-11, correspondiente al relleno sanitario del cantón Paute. El muestreo se realizó el 1 de diciembre de 2025, bajo condiciones ambientales controladas y conforme a metodologías estandarizadas establecidas en normas INEN y Standard Methods.

El agua analizada corresponde a lixiviados generados en el relleno sanitario, los cuales reciben actualmente un tratamiento físico (Humedales artificiales) previo a su descarga hacia un cuerpo hídrico de agua dulce. Ver Anexo 2.

5.2.2 Interpretación técnica de los resultados

La concentración de DBO_5 y DQO refleja la presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, característica típica de lixiviados provenientes de residuos sólidos con alta fracción orgánica, como los generados en el cantón Paute. Esta condición implica un factor de contaminación si los lixiviados no reciben un tratamiento adecuado antes de su disposición final.

Los resultados obtenidos confirman que el sistema actual de manejo de lixiviados necesita mantenimiento preventivo, a pesar de que cumple en parcialmente con los requerimientos ambientales mínimos establecidos por la normativa vigente. No obstante, al realizar un análisis comparativo, se evidencia que la descarga del sistema de alcantarillado presenta concentraciones de ciertos parámetros superiores a las registradas en el efluente tratado de lixiviados, lo que consiente inferir que el sistema de tratamiento se encuentra operando de manera funcional.

En consecuencia, desde el punto de vista técnico, se considera viable mantener el esquema de tratamiento existente para su implementación en la nueva celda del relleno sanitario, siempre que se contemplen las mejoras necesarias para optimizar su desempeño y garantizar el cumplimiento normativo.

5.2.3 Implicaciones para el diseño de la nueva celda

A partir del análisis de calidad del agua, el diseño de la nueva celda del relleno sanitario del cantón Paute se debe considerar obligatoriamente:

- Un sistema de impermeabilización eficiente (geomembrana HDPE) que evite la infiltración de lixiviados al suelo.
- Un sistema de drenaje de lixiviados dimensionado en función de la generación esperada, considerando la alta fracción orgánica de los residuos.

- La captación total de los lixiviados generados en la celda, evitando descargas no controladas.
- La conducción de los lixiviados hacia un sistema de tratamiento independiente y técnicamente adecuado.

5.2.4 Conclusiones del análisis de calidad del agua

El análisis de la calidad del agua residual del relleno sanitario del cantón Paute evidencia que el sistema actual de tratamiento de lixiviados no es suficiente para reducir la carga orgánica a niveles permisibles, lo cual representa un riesgo ambiental moderado. En consecuencia, el diseño de una nueva celda debe contemplar un sistema integral de captación y tratamiento de lixiviados.

La implantación del nuevo diseño de drenaje en el sistema de tratamiento permitirá garantizar la protección de los recursos hídricos y asegura la operación sostenible del relleno sanitario del cantón Paute a largo plazo.

5.3 Parámetros de diseño

5.3.1 Período de diseño

El período de diseño asumido para el presente proyecto es de 10 años, entre el 2027 y el 2037. Lapso solicitado por los técnicos de la entidad municipal y, principalmente, por la poca disponibilidad de terrenos para la disposición final.

El período de diseño propuesto será validado posteriormente mediante la aplicación de los criterios técnicos correspondientes, a partir de los cálculos que se desarrollarán en las siguientes etapas.

5.3.2 Proyección de población

El método de crecimiento adoptado es el lineal o aritmético con los parámetros siguientes:

- Tiempo: 10 años
- Población inicial: 30,398 habitantes, según proyección del PDOT
- Índice de crecimiento, según el PDOT: 0.6%
- Expresión matemática:

$$Nt = No + No \times r \times t$$

$$r = \frac{Nt/No - 1}{t}$$

Nt: Población inicial
No: Población final
t: Tiempo en años
r: Índice de crecimiento

Para el desarrollo del estudio se emplearon los datos poblacionales proporcionados en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), debido a que este instrumento de planificación territorial contiene proyecciones demográficas actualizadas y ajustadas a la dinámica de crecimiento local. A diferencia de los datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC),

que se presentan principalmente a partir de censos nacionales y proyecciones generales, el PDOT incorpora información territorial específica y criterios de planificación utilizados por el Gobierno Autónomo Descentralizado de Paute, lo cual permite trabajar con estimaciones poblacionales más coherentes con la realidad del área de estudio y con los procesos de planificación y gestión local. Ver Anexo 3.

5.3.3 Producción per cápita

La producción per cápita promedio determinada en el estudio de cuantificación de desechos corresponde a 0,51 kg/hab/día. Para efectos del diseño, se asume que este valor se mantendrá constante a lo largo del período de análisis. Cabe señalar que dicho indicador fue obtenido con base en la información proporcionada por el GAD de Paute y en la proyección de la población servida, considerada como el 65% de la población total. En las proyecciones se asumió una generación per cápita constante de 0,51 kg/hab/día, considerando que las condiciones demográficas, socioeconómicas y los patrones de generación de residuos del cantón no presentan cambios significativos que justifiquen la adopción de una tasa de crecimiento de este parámetro.

5.3.4 Aprovechamiento de volumen por asentamiento de los residuos sólidos.

El asentamiento de los residuos sólidos se produce por la acción combinada de la compactación, el peso de las capas superiores, la reducción de vacíos y la degradación de la materia orgánica, procesos que disminuyen progresivamente el volumen ocupado por la masa de residuos (Ordoñez & Villarraga Herrera, 2005).

Arévalo Durazno et al. (2021), en el análisis de la fase dos del relleno sanitario de Pichacay, utilizaron levantamientos topográficos e información proporcionada por la EMAC EP. En una de las zonas evaluadas determinaron rangos de asentamiento de hasta 10,49 % respecto a la altura de la columna de residuos. El mismo estudio indica, con base en Di Stefano (1996), que los asentamientos pueden alcanzar hasta el 25 % del espesor de los residuos depositados.

Debido a que el relleno sanitario de Paute no dispone de registros históricos de control topográfico ni de monitoreo de asentamientos, no es posible establecer un porcentaje propio para el sitio. Por esta razón, se adopta una reducción volumétrica del 15 %, con base en los siguientes criterios: (i) el valor de 10,49 % medido en Pichacay corresponde a un relleno sanitario de la misma provincia, con condiciones climáticas similares, y constituye la referencia regional más cercana; (ii) los residuos de Paute presentan un 70 % de materia orgánica, fracción cuya degradación prolonga los asentamientos durante la vida útil del relleno, por lo que es razonable adoptar un valor superior al registrado en una zona puntual de Pichacay; y (iii) se descarta el máximo de 25 % reportado en la literatura, porque sobrestimaría la capacidad disponible y la vida útil. En consecuencia, el 15 % constituye un valor intermedio y prudente entre la referencia regional y el máximo reportado (Ordoñez & Villarraga Herrera, 2005)

Para el cálculo preliminar se supone que el área ocupada permanece constante y que la reducción vertical puede aproximarse a una reducción volumétrica equivalente. El volumen recuperado no se considera una capacidad garantizada y deberá verificarse mediante levantamientos topográficos periódicos. Adicionalmente, en la sección 5.5.1 (Tabla 13) se presenta un análisis de sensibilidad con los escenarios de 0 % (sin aprovechamiento por asentamiento), 10,49 %, 15 % y 25 %, que muestra la influencia de este parámetro en el volumen requerido y en la vida útil.

5.3.5 Cobertura de la recolección de desechos

En la actualidad la cobertura del servicio de recolección de basura es del 65% de la población.

5.3.6 Proyección de la producción y recolección de residuos sólidos

Con los parámetros indicados en el numeral anterior, la proyección de las cantidades producidas y recogidas se determina a base de las ecuaciones siguientes:

$$DSP = Pob * PPC$$

$$DSR = DSP * CR$$

Donde:

RSM= Residuos Sólidos Municipales.

DSP= Cantidad de RSM producidos (kg/día)

DSR= Cantidad de RSM recogidos (kg/día)

Pob= Población total (habitantes)

PPC= Producción percápita (kg/hab/día)

CR= Cobertura de la Recolección

En la tabla 6, se expone la proyección de los residuos sólidos.

Tabla 6. Proyección de los residuos sólidos

No.	**AÑO**	**POBLACIÓN** (habitantes)	**Generación Per cápita PPC** (kg/hab/día)	**Cantidad de Residuos Sólidos Municipales Producidos DSP** (kg/día)	**Cobertura de Recolección CR** %	**Cantidad de residuos Sólidos Municipales Recogidos DSR** (kg/día)
0	2027	30,563	0.510	10,125	65.0%	10,125
1	2028	30,563	0.510	10,125	65.0%	10,125
2	2029	30,866	0.510	10,225	65.0%	10,225
3	2030	31,004	0.510	10,271	65.0%	10,271
4	2031	31,189	0.510	10,332	65.0%	10,332
5	2032	31,375	0.510	10,394	65.0%	10,394
6	2033	31,562	0.510	10,456	65.0%	10,456
7	2034	31,751	0.510	10,518	65.0%	10,518

8	2035	31,940	0.510	10,581	65.0%	10,581
9	2036	32,131	0.510	10,644	65.0%	10,644
10	2037	32,323	0.510	10,708	65.0%	10,708

Tabla 7. Volumen anual del relleno sanitario con aprovechamiento por asentamiento (estimación preliminar con 20 % de material de cobertura)

No.	AÑO	VRS TOTAL ANUAL		
		Parcial	***Aprovechamiento por asentamiento***	***Acumulado***
		(m3/año)	(m3/año) 15%	(m3/año)
0	2027	5,543	4,712	4,712
1	2028	5,543	4,712	9,424
2	2029	5,598	4,758	14,182
3	2030	5,623	4,780	18,962
4	2031	5,657	4,808	23,770
5	2032	5,691	4,837	28,607
6	2033	5,725	4,866	33,473
7	2034	5,759	4,895	38,368
8	2035	5,793	4,924	43,292
9	2036	5,828	4,953	48,245
10	2037	5,862	4,983	53,228

5.4 Ampliación del relleno Sanitario

5.4.1 Evaluación de la viabilidad técnica y administrativa del emplazamiento actual

La evaluación se realizó mediante una lista de comprobación de los requisitos mínimos del numeral 4.12.4 del Libro VI, Anexo 6 del TULSMA. El resultado Cumple se asigna cuando la tesis presenta evidencia suficiente; No cumple incluye tanto el incumplimiento observado como la falta de información verificable.

Tabla 8. Evaluación técnica del emplazamiento actual

Parámetro	Requisito	Evidencia disponible	Resultado
Protección ambiental y cultural	No afectar recursos hídricos, flora, fauna, zonas agrícolas, paisaje o bienes culturales	No existe una evaluación integral documentada de todas las restricciones	No cumple
Fuente superficial	Mínimo 200 m hasta la fuente superficial más próxima	La inspección indica que no hay fuentes cercanas	Cumple
Geología y amenazas	Excluir fallas, inestabilidad, quebradas, deslaves, agrietamientos e inundaciones	Existe un estudio de suelos; falta completar la verificación espacial de amenazas y la estabilidad de las tres terrazas	No cumple
Compatibilidad urbana y viviendas	Compatibilidad con el ordenamiento urbano y mínimo 500 m hasta las viviendas más próximas	Según análisis multicriterio se encuentra en un rango fuera de 500 m	Cumple
Accesibilidad	Cercanía a vías de fácil acceso para vehículos recolectores	El sitio está a aproximadamente 240 m de la vía principal y dispone de accesos internos	Cumple
Material de cobertura	Disponibilidad suficiente y extracción sencilla	Se identifica un banco y material de desalojo, pero no se demuestra el volumen disponible para todo el periodo	No cumple

Parámetro	Requisito	Evidencia disponible	Resultado
Impermeabilización	Permeabilidad igual o menor que 1×10^{-7} cm/s o uso de una alternativa impermeabilizante	Se dispone y se proyecta impermeabilización con geomembrana y material de suelo compactado	Cumple
Vida útil	Periodo estimado mínimo de 7 años	El volumen disponible de 40.865,87 m³ es inferior a los 52.266 m³ netos proyectados para 2027 a 2036	Cumple
Centros educativos y de salud	Verificar la separación respecto de equipamientos sensibles como criterio complementario de planificación	La tesis no presenta distancias medidas a escuelas, colegios o centros de salud	No cumple

Tabla 9. Evaluación administrativa y operativa

Componente	Evaluación	Resultado
Cerramiento, señalización y control de acceso	No se demuestra el cumplimiento conjunto de cerramiento, rótulos, horarios, control de acceso y avisos de emergencia	No cumple
Servicios básicos	Existe drenaje de lixiviados, pero no se documentan todos los servicios mínimos requeridos	No cumple
Seguridad y primeros auxilios	El manual incorpora medidas generales; no se demuestra su aplicación, capacitación y dotación actual	No cumple
Servicios higiénicos	No se documenta su existencia y condición para uso del personal	No cumple
Registro diario y caracterización	No existe báscula ni registro diario de masa y volumen; la caracterización no se actualiza anualmente	No cumple
Control de vectores	Durante la inspección se observó presencia de vectores y cobertura irregular	No cumple
Control de dispersión por viento	La cobertura no es uniforme y no se acredita un control permanente de residuos ligeros	No cumple
Manejo de lixiviados	Existe drenaje y humedal, pero el efluente no cumple DBO_5 y DQO	No cumple
Colocación y cobertura de residuos	No existe una celda estandarizada y la cobertura presenta espesores variables	No cumple
Captación de gases	El sitio dispone de chimeneas; falta medición, quema o aprovechamiento del biogás	Cumple
Drenaje de aguas lluvias	Se describen cunetas y drenajes perimetrales; su estado y continuidad deben verificarse	Cumple
Esparcido y compactación	Actualmente no se ejecuta compactación técnica en capas máximas de 0,60 m	No cumple
Dirección técnica	La operación está a cargo de Gestión Ambiental; no se acredita dirección y vigilancia de un ingeniero sanitario	No cumple
Inspección de la autoridad	No se presentan actas o informes de inspección regular de la autoridad ambiental	No cumple
Permiso y planes	La tesis identifica permiso ambiental de operación y plan de cierre y poscierre	Cumple
Presupuesto y maquinaria	Existe asignación presupuestaria, pero no hay maquinaria dedicada ni compactador sanitario	No cumple

5.4.2 Síntesis de viabilidad

La evaluación indica que el emplazamiento actual conserva ventajas técnicas relacionadas con el acceso vial, la infraestructura instalada y la disponibilidad de terreno municipal. Sin embargo, con la información disponible no se demuestra el cumplimiento integral de los requisitos de localización ni de operación establecidos para un relleno sanitario mecanizado. En el componente administrativo, el GAD Municipal de Paute mantiene la responsabilidad directa del servicio y dispone de permiso ambiental, presupuesto e infraestructura básica, pero presenta deficiencias en pesaje, registros, compactación, cobertura, control de vectores, tratamiento de

lixiviados, manejo de biogás, disponibilidad permanente de maquinaria y evidencia de inspecciones técnicas.

En consecuencia, la permanencia del relleno sanitario en su ubicación actual se considera técnica y administrativamente condicionada. La ampliación deberá acompañarse de la verificación documental de distancias y restricciones territoriales, la regularización ambiental aplicable y un programa de mejora operativa con responsables, presupuesto, maquinaria, control de ingreso, seguimiento de densidad, cobertura diaria, monitoreo de lixiviados y control de gases.

5.4.3 Comparación entre mantener y relocalizar el relleno sanitario

Para completar la evaluación de viabilidad, se comparó la alternativa de mantener y ampliar el relleno sanitario en su ubicación actual con la de relocalizarlo, empleando los criterios técnicos, ambientales, sociales y económicos planteados en el objetivo específico, a los que se añadió el criterio administrativo. Para la alternativa de relocalización se utilizó el análisis multicriterio desarrollado mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y la superposición ponderada en ArcMap 10.8 (Anexo 9), que consideró como criterios la distancia a cuerpos hídricos (mínimo 200 m), a zonas urbanas (mínimo 5 km), a áreas protegidas (mínimo 500 m) y a vías (mínimo 200 m), además de la pendiente del terreno. El resultado evidenció que las zonas aptas del cantón son escasas, pequeñas y dispersas, por lo que es altamente improbable que alguna cumpla los requisitos de tamaño, accesibilidad y operación de un relleno sanitario. La comparación entre ambas alternativas se resume en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación entre mantener el relleno sanitario en su ubicación actual y relocalizarlo

Criterio	Mantener y ampliar en el sitio actual	Relocalizar	Alternativa favorable
Técnico	Infraestructura instalada (geomembrana, drenaje de lixiviados, humedal artificial, chimeneas y vías internas), plataforma central de aproximadamente 3 ha ya intervenida y capacidad de 41.565 m³ en tres terrazas; condicionada a la verificación geotécnica del relleno antiguo.	Zonas aptas escasas, pequeñas y dispersas según el análisis multicriterio (Anexo 9); los dos puntos aptos evaluados no se consideran viables por superficie insuficiente (sitio A) y por falta de accesibilidad (sitio B). Requiere estudios completos y la construcción de toda la infraestructura desde cero.	Mantener
Ambiental	Impacto concentrado en un sitio ya intervenido; exige optimizar el tratamiento de lixiviados (DBO_5 y DQO no cumplen) y el control del biogás.	Afectaría un nuevo predio y exigiría, además, el cierre técnico del sitio actual; las restricciones de cuerpos hídricos y áreas protegidas limitan las opciones.	Mantener (condicionado)
Social	Sitio conocido y operado por el GAD, ubicado a 5.03 km del centro urbano; debe verificarse la distancia mínima de 500 m a viviendas.	Requiere 5 km de separación de centros urbanos y una nueva comunidad receptora, con mayor probabilidad de conflictos socioambientales.	Mantener
Económico	Terreno municipal de 7 ha y presupuesto referencial de ampliación de USD 423,945.45 (Anexo 8).	Adquisición de un predio (el Municipio no dispone de terrenos destinados), estudios, licenciamiento, infraestructura nueva y cierre del sitio actual, con un costo mayor.	Mantener
Administrativo	Dispone de permiso ambiental de operación y de plan de cierre y poscierre; debe corregir las deficiencias operativas de la Tabla 9.	Implica un nuevo proceso de regularización ambiental, contratación y socialización.	Mantener

Para verificar este resultado se seleccionaron dos puntos dentro de las zonas aptas del análisis multicriterio (Anexo 9). El sitio A, ubicado en el sector sur del cantón, cumple con los cinco criterios y se encuentra a unos 350 m de la vía principal, sin embargo la zona apta donde se ubica tiene apenas 5.3 ha, siendo menor a las 7 ha del predio actual. El sitio B, ubicado en el sector nororiental, también cumple con los cinco criterios y tiene 59.5 ha continuas, pero se encuentra a unos 9 km de la vía principal y a más de 15 km de la cabecera cantonal, por lo que su acceso tendría que atravesar terrenos con pendientes mayores al 20 %. Por lo tanto, con la información disponible ninguno de los dos puntos se considera viable en esta etapa preliminar.

En los cinco criterios evaluados, la alternativa de mantener y ampliar el relleno sanitario en su ubicación actual resulta favorable frente a la relocalización. En consecuencia, se descarta la relocalización en el corto y mediano plazo y se adopta la ampliación del sitio actual, condicionada al cumplimiento de las medidas señaladas en la síntesis de viabilidad. Una vez agotada la capacidad del sitio, se recomienda evaluar soluciones mancomunadas con cantones vecinos, tal como sugiere el análisis multicriterio.

5.4.4 Justificación de la ampliación

La alternativa seleccionada para la disposición final de los residuos sólidos es la ampliación del relleno sanitario mecanizado utilizando el método constructivo de vaguada, selección que obedece a la cantidad de desechos producidos en el área de cobertura del servicio de recolección, así como a las condiciones observadas en el área destinada para su construcción: Topografía, hidrogeología, clima, vía de acceso, disponibilidad de servicios básicos (agua potable y energía eléctrica), entre otras.

La celda de confinamiento en relleno sanitario se prevé ubicarlo dentro del mismo relleno sanitario dentro de la ciudad de Paute, el terreno tiene una extensión de 7 hectáreas aproximadamente, su distancia a la vía principal es de 240 m.

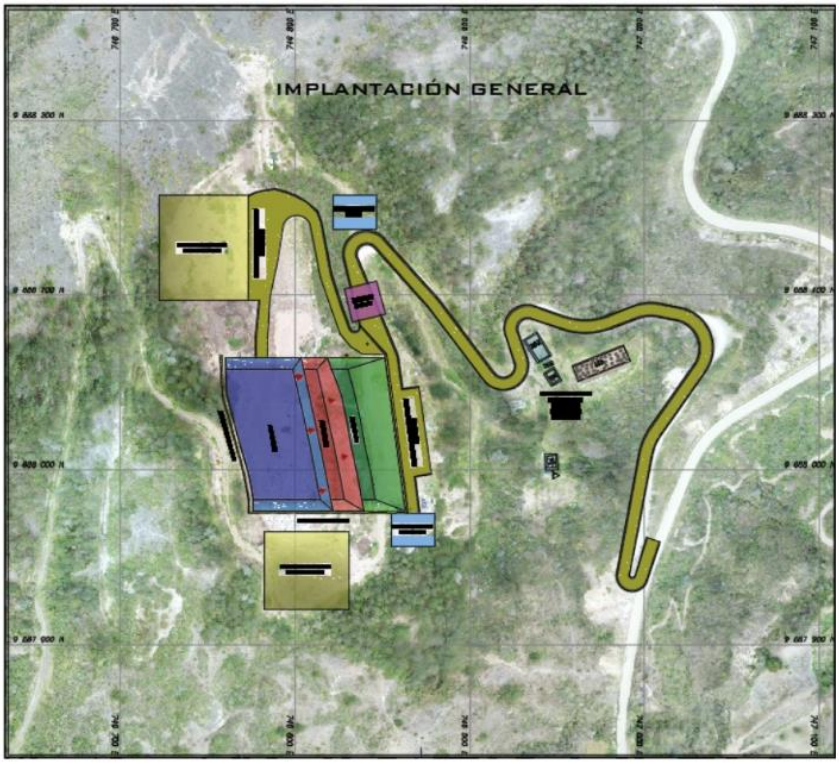
Los componentes principales del relleno sanitario son:

a) Áreas para disposición final:
   - Área para desechos no peligrosos
b) Manejo de lixiviados:
   - Drenaje desde celda de confinamiento
   - Tanque de distribución
   - Humedales artificiales
   - Descarga del efluente
c) Manejo de gases:
   - Chimeneas
d) Drenaje de aguas lluvias:
   - Cunetas perimetrales
e) Plataforma o patio para maniobra de los vehículos y acopio de materiales de cobertura

Adicionalmente, para la operación del relleno y el manejo integral de los desechos, se prevé la infraestructura que se muestra en la Ilustración 10:

- Vías de acceso y para la circulación interna.
- Área para pesaje de vehículos, áreas proyectadas para reciclaje y compostaje.

Ilustración 10. Implantación General del Relleno Sanitario



5.5 Compactación y densidades

5.5.1 Volumen del relleno sanitario

El espacio o volumen requerido para el relleno sanitario está en función de las cantidades de desechos recogidos, descontando los reciclables que se recuperarán durante el proceso de Gestión Integral.

Otros factores que intervienen en la determinación del volumen son el grado de compactación, la densidad de los desechos estabilizados y el espacio que ocupa el material de cobertura.

Los parámetros para el cálculo del volumen están en la tabla 11:

Tabla 11. Parámetros para el cálculo del volumen del Relleno Sanitario

DSR: Cantidad de RSM recogidos (kg/día)	**Tabla 6**
DRSM: Densidad de los RSM estabilizados (kg/m3)	800
Días del año:	365

Material de cobertura: % volumen de RSM		30%
Potencial de aprovechamiento de los RSM:		Estudio de calidad y cantidad
	Orgánicos:	0.00%
	Reciclable:	0.00%
	No reciclable:	0.00%
Cantidades reciclables:		
	Orgánicos:	86.048%
	Reciclable:	13.952%
Cantidades al Relleno Sanitario:		
	Cantidades recogidas – Cantidades reciclables	

En esta investigación, la reducción volumétrica del 15 % se presenta como un escenario técnico de cálculo y no como una capacidad garantizada. Su aplicación deberá validarse mediante hitos topográficos y el seguimiento periódico de las cotas durante la operación.

En la tabla 12, se presenta la proyección del volumen necesario del Relleno Sanitario para disponer los desechos sólidos no peligrosos-no reciclables, recogidos durante el período de diseño.

Tabla 12. Volumen del Relleno Sanitario para 10 años con celda de confinamiento

No.	AÑO	POBLACIÓN	COBERTURA	POBLACIÓN SERVIDA	GPC	PRODUCCIÓN	AL RELLENO	RECOLECCIÓN	AL RELLENO	VOLUMEN RELLENO SANITARIO			VRS TOTAL ANUAL		
									No reciclable	*Basura*	*Material cobertura*	*Total*	*Parcial*	*Aprovechamiento por asentamiento*	*Acumulado*
		(habitantes)			(kg/hab/día)	(kg/día)	%	(kg/día)	(kg/día)	(m3/día)	(m3/día)	(m3/día)	(m3/año)	(m3/año)	(m3/año)
														15%	
0	2027	30.563	65,0%	19.866	0,510	10.125	100,0%	10.125	10.125	12,7	3,8	16,5	6.005	5.104	5.104
1	2028	30.563	65,0%	19.866	0,510	10.125	100,0%	10.125	10.125	12,7	3,8	16,5	6.005	5.104	10.209
2	2029	30.866	65,0%	20.063	0,510	10.225	100,0%	10.225	10.225	12,8	3,8	16,6	6.065	5.155	15.364
3	2030	31.004	65,0%	20.153	0,510	10.271	100,0%	10.271	10.271	12,8	3,9	16,7	6.092	5.178	20.542
4	2031	31.189	65,0%	20.273	0,510	10.332	100,0%	10.332	10.332	12,9	3,9	16,8	6.128	5.209	25.751
5	2032	31.375	65,0%	20.394	0,510	10.394	100,0%	10.394	10.394	13,0	3,9	16,9	6.165	5.240	30.991
6	2033	31.562	65,0%	20.516	0,510	10.456	100,0%	10.456	10.456	13,1	3,9	17,0	6.202	5.271	36.262
7	2034	31.751	65,0%	20.638	0,510	10.518	100,0%	10.518	10.518	13,1	3,9	17,1	6.239	5.303	41.565
8	2035	31.940	65,0%	20.761	0,510	10.581	100,0%	10.581	10.581	13,2	4,0	17,2	6.276	5.334	46.899
9	2036	32.131	65,0%	20.885	0,510	10.644	100,0%	10.644	10.644	13,3	4,0	17,3	6.313	5.366	52.266
10	2037	32.323	65,0%	21.010	0,510	10.708	100,0%	10.708	10.708	13,4	4,0	17,4	6.351	5.398	57.664

De los cálculos presentados en la Tabla 12 se desprende que, para el período de diseño de 10 años (2027 a 2036), se requiere un volumen de 52,266 m3 para la disposición final de los RSM, considerando un 30 % de material de cobertura y un aprovechamiento por asentamiento del 15 %. El valor acumulado de 57,664 m3 corresponde al año 2037 y se presenta únicamente como referencia.

Para evaluar la influencia del porcentaje de asentamiento adoptado, en la Tabla 13 se presenta un análisis de sensibilidad con los escenarios de 0 % (sin aprovechamiento), 10,49 % (valor medido en Pichacay), 15 % (valor adoptado) y 25 % (máximo reportado en la literatura), en el que se compara el volumen requerido con el volumen disponible de 41.565 m3 calculado en la sección 5.7.

Tabla 13. Análisis de sensibilidad del aprovechamiento por asentamiento

Escenario de asentamiento	**Volumen requerido 2027–2036 (m3)**	**Cobertura con 41.565 m3 (%)**	**Vida útil estimada (años)**
0 % (sin aprovechamiento)	61,490	66.5 %	6.7
10.49 % (Pichacay)	55,040	74.2 %	7.5
15 % (adoptado)	52,266	78.2 %	7.9
25 % (máximo de literatura)	46,118	88.6 %	8.9

En todos los escenarios, el volumen disponible es inferior al requerido para 10 años. Con el escenario adoptado (15 %), el volumen disponible cubre el 78.2 % del volumen requerido, lo que equivale a una vida útil aproximada de 7.9 años, es decir, hasta finales de 2034. La diferencia entre el escenario sin aprovechamiento (0 %) y el máximo de literatura (25 %) es de 2.2 años, por lo que el porcentaje adoptado no modifica la conclusión principal; su valor real deberá confirmarse mediante hitos topográficos durante la operación.

5.6 Selección de equipos para la optimización de la compactación de residuos

Debido a las limitaciones presupuestarias del GAD municipal de Paute para la adquisición de equipos especializados, se plantea la utilización de una retroexcavadora sobre orugas como equipo principal para las actividades de disposición, conformación y compactación de residuos. Si bien este tipo de maquinaria no está diseñada específicamente para la compactación, sus características permiten alcanzar niveles de densificación superiores a los obtenidos en condiciones de operación no controladas.

La retroexcavadora sobre orugas presenta una presión de contacto moderada (30–60 kPa), producto de su peso operativo (20–25 toneladas) distribuido en una amplia superficie de apoyo.

Este valor permite un efecto de pre-compactación y reacomodo mecánico de los residuos, especialmente cuando se aplican múltiples pasadas sobre capas de pequeños espesores.

Para optimizar proceso tienen que operar con capas delgadas de residuos (0,6 m) y realizar múltiples pasadas mínimo de 4 a 6 sobre cada capa, esto reduce los vacíos y aumenta la densidad final alcanzada. La densidad alcanzable depende de la composición, la humedad, el espesor de las capas, el número de pasadas y el equipo. Como referencia, la U.S. EPA reporta un intervalo aproximado de 653 a 830 kg/m³ para residuos compactados y recomienda 688 kg/m³ cuando no se dispone de información específica del sitio, por lo cual se opta por el valor de 800 kg/m3 como se indica en la tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de compactación.

DSR: Cantidad de RSM recogidos (kg/día)	**Tabla 6**
DRSM: Densidad de los RSM estabilizados (kg/m3)	800
Días del año:	365
Material de cobertura: % volumen de RSM	30%

Se recomienda una retroexcavadora sobre orugas con una potencia mínima de 180 HP y un peso superior a 20 toneladas, lo que garantiza la capacidad de empuje, estabilidad y esfuerzo de penetración en la masa de residuos.

El uso de orugas proporciona grandes ventajas frente a equipos sobre ruedas, brindando una mejor distribución de cargas, mayor tracción y menor riesgo de atascamiento, esto ayuda en superficies inestables comunes en un relleno sanitario en operación.

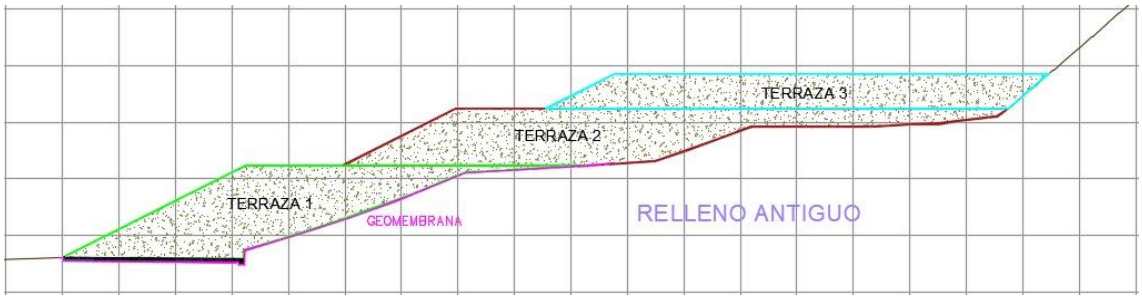
5.7 Dimensionamiento de la celda de confinamiento

El área total disponible para la ampliación del relleno sanitario y áreas complementarias es de 7 ha, de esta extensión, se prevé la utilización de un espacio de aproximadamente de 88.57 m x 90.94 m (7,856.23 m2) para la disposición final con construcción mecánica, es decir zanjas o trincheras y sobre éstas el método de vaguada. Ver Anexo 4.

5.7.1 Método de Vaguada

La utilización del espacio disponible con el método de vaguada se presenta en la ilustración 11.

Ilustración 11. Método de Vaguada



Características Geométricas, se describen en la tabla 15.

Tabla 15. Características geométricas de las áreas.

Cantidad de Áreas	**3 u**	**Volúmenes.**
Volumen total:		40,865.872 m^3
Área total:	7,856.23 m^2	
Anchos superior e inferior		
Terraza 1	38.75 m y 44,66 m, en promedio.	16524.1875 m^3
Terraza 2	48.45 m y 58,45 m, en promedio.	15345.75 m^3
Terraza 3	37.19 m y 54,35 m, en promedio.	8995.935 m^3

Es importante considerar que todas las medidas anteriormente presentadas corresponden a valores promedio, debido a la irregularidad de los polígonos que se generan en cada una de las terrazas, ya que in situ estas están previamente formadas, como se muestra en la ilustración 12 y se describe en la tabla 16.

Ilustración 12. Estado actual de las terrazas.



Tabla 16. Volumen requerido para el relleno sanitario

Altura promedio	
Terraza 1:	3 m
Terraza 2:	5 m
Terraza 3:	6 m
Volumen requerido para el Relleno Sanitario	**52,266.00 m3**
Volumen disponible	

Método vaguada:	40,865.8725 m^3
Total:	**40,865.8725 m3, equivalente al 78,2 % del volumen requerido (vida útil aproximada de 7 años).**

5.7.2 Secuencia de la construcción de Áreas

Se plantea la ampliación del relleno sanitario mediante el método de vaguada, el cual consiste en la disposición de los residuos sólidos sobre la superficie del terreno en capas sucesivas. Cada capa de residuos es compactada y posteriormente cubierta con material de cobertura, repitiéndose este proceso de manera progresiva hasta alcanzar las dimensiones establecidas en el área de diseño. Ver Anexo 4.

Para esto se formarán tres terrazas a diferentes niveles, aprovechando la topografía del sitio.

La forma propuesta de construcción presenta las ventajas siguientes:

- Mantener un frente general de trabajo y control centralizado Área.
- Disponer de un espacio suficiente (plataforma) para los siguientes fines:
  - ✓ Maniobras de los vehículos de recolección
  - ✓ Maniobras del equipo caminero para la construcción de las áreas
  - ✓ Mantener un stock de materiales de cobertura y de construcción
  - ✓ Acopio de escombros que podrían servir de material de cobertura
- Cerrar en forma progresiva y definitiva los rellenos Área
- Reducir la cantidad de lixiviados
- El personal operativo adquirirá experiencia en el método de relleno
- Permitirá al personal técnico evaluar los resultados de la gestión de disposición final para las siguientes etapas de creación de Áreas.

5.8 Construcción de celdas diarias

La celda diaria está conformada básicamente por los RSM no peligrosos-no reciclados y el material de cobertura, entre los factores básicos que influyen en su dimensionamiento y volumen podemos citar los siguientes:

- La cantidad de RSM:
  - ✓ Cantidad recogida no reciclada que se debe disponer.
  - ✓ Cantidad crítica: Total recogido, evento en que no se recicle.
  - ✓ Los días previstos para la recolección.
- Descarga de los RSM en el relleno sanitario
- La operación mecanizada.
- El grado de compactación de los desechos
- Los parámetros geométricos:
  - ✓ El frente de trabajo.
  - ✓ El espesor o altura, incluido el material de cobertura.

- ✓ Sentido de avance del frente de trabajo.

- El método de relleno: Área las dimensiones se representan en la tabla 17 e ilustración 13.

Tabla 17. Dimensiones de celda diaria

Dimensiones de celda		
b	6	m
h	1.2	m
c	2.4	m
x	2.43	m
X (asumido)	2.50	m
Volumen residuos estabilizados	26.77	m3
Cálculo de cobertura		
Área de rampa	16.10	m2
Largo	4.90	m
Ancho	6	m
Área horizontal	29.4	m2
Largo	4.90	m
Ancho	6	m
Área total	45.50	m2
Espesor	0.15	m
Volumen de cobertura	6.82	m3
% material de cobertura	25%	Del volumen de residuos
Se asume un 30% de material de cobertura a referencia de los residuos estabilizados que constituyen la celda, esto debido a la presencia de vacíos en la celda, con el fin de mitigar los efectos de asentamiento.		

5.8.1 Aclaración del dimensionamiento de la celda operativa tipo

El dimensionamiento de la celda operativa tipo no se realizó considerando únicamente el volumen de residuos que ingresa durante un día. Se adoptó una capacidad correspondiente a dos jornadas de operación, equivalente a 26,769 m³ de residuos compactados, con la finalidad de disponer de un frente de trabajo manejable que facilite la descarga, el extendido, la conformación y la cobertura mediante una retroexcavadora de orugas.

A partir del volumen total previsto para la celda se obtuvo una longitud horizontal calculada de 2,43 m. Para facilitar el replanteo, la construcción y las maniobras de la maquinaria, esta dimensión se redondeó a 2,50 m. Por tanto, el valor de 2,50 m corresponde a una dimensión constructiva adoptada y no al volumen del material de cobertura.

La cantidad de material necesaria para cubrir las superficies expuestas se determinó considerando un área de rampa de 16,10 m², un área horizontal de 29,40 m² y un espesor de cobertura de 0,15 m. El volumen geométrico es (16,10 m² + 29,40 m²) × 0,15 m = 6,825 m³, que se redondea a 6,82 m³.

El valor de 6,82 m³ corresponde al material requerido para cubrir la superficie expuesta de la celda terminada. Para la planificación y disponibilidad de material se adopta una proporción máxima del 30 % respecto al volumen de residuos, equivalente a 8,03 m³. La diferencia de 1,21 m³ constituye un margen operativo para cubrir irregularidades, vacíos y pérdidas durante el transporte y el extendido. No debe indicarse que este margen se utiliza para mitigar el asentamiento.

Tabla 18. Conciliación de dimensiones y material de cobertura

Concepto	Cálculo o criterio	Resultado
Periodo de operación	Dos jornadas	2 días
Volumen de residuos	Masa de diseño dividida para 800 kg/m³	26,769 m³
Longitud horizontal calculada	Resultado geométrico	2,43 m
Longitud constructiva	Redondeo para replanteo y operación	2,50 m
Área expuesta	16,10 + 29,40	45,50 m²
Cobertura geométrica	45,50 × 0,15	6,82 m³
Relación geométrica	6,825 / 26,769	25,5 %
Provisión de diseño	26,769 × 30 %	8,03 m³
Margen operativo	8,03 - 6,82	1,21 m³

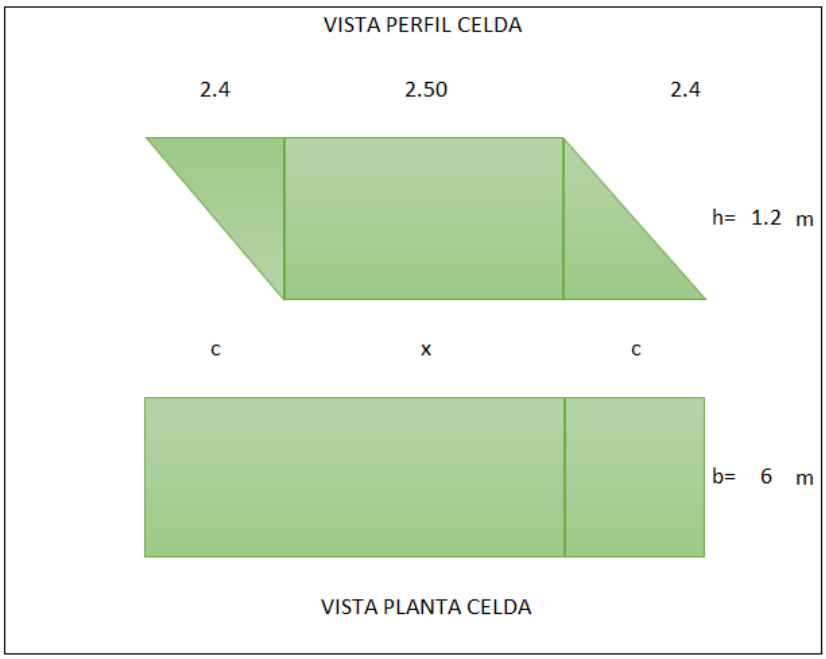
5.8.2 Recomendación de cobertura temporal

Debido a que la celda operativa tipo está dimensionada para recibir los residuos generados durante dos jornadas, se recomienda colocar, al finalizar el primer día, una cobertura sintética temporal reutilizable, tipo lona impermeable reforzada, resistente al desgarro y a la radiación ultravioleta. Esta cobertura debería extenderse sobre la totalidad de los residuos expuestos y asegurarse mediante anclajes perimetrales para evitar su desplazamiento por acción del viento.

La cobertura sintética permitiría controlar temporalmente la dispersión de residuos, la presencia de vectores, la generación de olores y el ingreso directo de agua lluvia. Al inicio de la jornada siguiente se retiraría para continuar con la conformación de la celda. Una vez completado el volumen correspondiente a las dos jornadas, se colocaría la cobertura de suelo de 0,15 m de espesor.

La cobertura sintética sería una medida temporal y no sustituiría el material de cobertura de la celda terminada. En caso de rotura o de imposibilidad de asegurar adecuadamente la lona, se recomienda aplicar material de cobertura como medida de contingencia. Este dimensionamiento corresponde a la operación propuesta para la ampliación y no representa las condiciones actuales de compactación.

Ilustración 13. Vistas de celda diaria



a) Operación mecanizada del relleno

La disposición final de los desechos sólidos se realizará íntegramente en forma mecanizado con cargadora o retroexcavadora, con equipos y herramientas apropiados para este tipo de operación.

b) Grado de compactación

El grado de compactación esperado de los residuos sólidos compactados es de 800 kg/m3.

c) Construcción de las celdas

La celda diaria de disposición será manejada mediante equipos y maquinaria especializada como:

- Retroexcavadora oruga.

La finalidad de utilizar maquinaria es lograr mayor compactación de los residuos, disminuir el volumen ocupado y mejorar la estabilidad del relleno.

El modelo de operación de las celdas consta en colocar capas sucesivas de desechos, siendo cada una de ellas compactadas con maquinaria y se cubren diariamente con material de cobertura, formando así plataformas de disposición, optimizando al máximo la ocupación del espacio.

Se maneja con un sistema de impermeabilización, que incluirá geomembrana de polietileno de alta densidad y arcilla o material de sitio compactado, la cobertura es diaria al final de cada jornada.

Dentro de este el drenaje de lixiviados se realizará mediante drenes y lagunas de tratamiento, además el sistema de captación de biogás se realizará mediante chimeneas y sistemas de quema, dado que el GAD Municipal no cuenta con los recursos suficientes para planificar un sistema de aprovechamiento de gases.

El drenaje pluvial se realiza mediante cunetas, canales, zanjas de drenaje y conducciones.

A continuación, se expone la ilustración 14, en la que explica de manera completa la operación del relleno en todas sus fases.

Ilustración 14. Proceso completo de relleno sanitario



5.8.3 Celdas en el método de Vaguada

En el método de vaguada no se cuenta con el límite perimetral, las celdas se asemejan a troncos de cono y paralelepípedos; los criterios para la construcción de las celdas consisten en el depósito de residuos sobre el suelo natural y la posterior colocación de capas sucesivas, tanto de residuos como de material de cobertura. Ver Anexo 4.

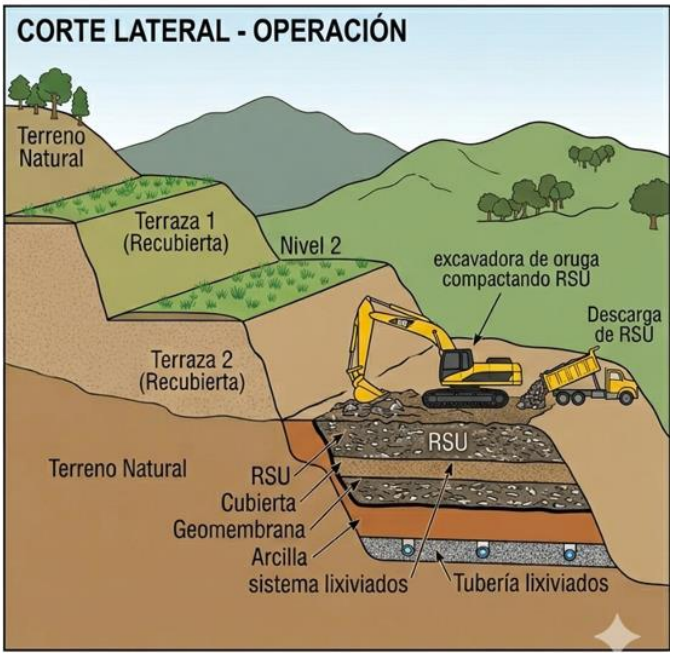
Cada una de estas capas de compactan mecánicamente con maquinaria y se construye una celda diaria, que es el volumen de residuos depositados.

La ampliación se organiza en tres terrazas. La Terraza 1 dispone de aproximadamente 16.524,19 m³; la Terraza 2, 15.345,75 m³; y la Terraza 3, 8.995,94 m³. La capacidad total geométrica es 40.865,87 m³. Frente a la demanda corregida para 2027-2036, este volumen cubre cerca de 66,4 % sin acreditar asentamiento o 78,1 % bajo el escenario hipotético de 15 %, por lo que la propuesta actual no alcanza por sí sola el horizonte de diez años.

a) Descarga de los RSM

Sobre las áreas terminadas se elevarán las celdas de desechos aplicando el método de vaguada, como se indica en la ilustración 15.

Ilustración 15. Celdas de desechos, métodos de vaguada



b) Construcción de las celdas

Secuencia propuesta para la construcción:

- Primera plataforma de celdas
  - ✓ Primera *celda esquinera*
  - ✓ Se continúa en el sentido transversal hasta cubrir todo el ancho, obteniéndose la primera franja de celdas.
  - ✓ Se repite el proceso hasta construir la cuarta o quinta franjas de celdas
- Segunda plataforma de celdas sobre la primera, siguiendo un proceso similar.
- Tercera plataforma de celdas sobre la segunda, siguiendo un proceso similar.

5.8.4 Plataforma para maniobras

Para las maniobras de los vehículos en la descarga de los residuos sólidos se acondicionará el nivel del terreno natural en el espacio o área correspondiente a las tres zanjas siguientes, como se indica en la ilustración 16.

Ilustración 16. Plataforma para maniobras y acopio de materiales.



El área destinada para la plataforma de maniobras esta previamente establecida, dado que en este espacio no se cuenta con infraestructura y se mantiene lo suficientemente compactado el material para resistir la carga de los vehículos y maquinaria.

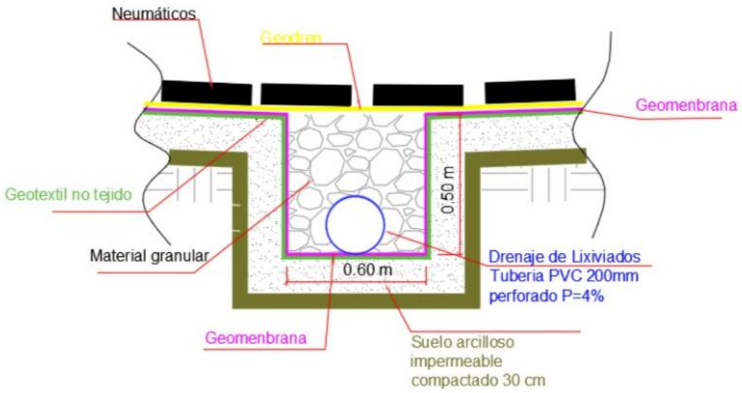
El área restante no utilizada podrá servir para varios propósitos, tales como acopio de material de cobertura, escombros, materiales de construcción, etc.

5.9 Drenaje y evacuación de lixiviados

5.9.1 Descripción de la red de drenaje

Para la captación y evacuación del percolado de la ampliación de las celdas que conforman el relleno sanitario, se plantea la ilustración 17, esquema de drenaje y colectores.

Ilustración 17. Esquema referencial Sistema de Drenaje y Evacuación de Lixiviado



El sistema propuesto está constituido por un dren tipo “media espina de pez”, conformado por tuberías perforadas dispuestas sobre una capa de material granular en la parte inferior de la terraza nro. 1 del relleno sanitario. Ver Anexo 4.

Posteriormente, un colector conecta la tubería de drenaje con la cámara primaria de lixiviados, desde donde el efluente es conducido hacia la piscina de tratamiento mediante humedales artificiales. Este sistema se diseña aprovechando la topografía natural del terreno del relleno sanitario, permitiendo que el flujo se realice por gravedad, sin necesidad de sistemas de bombeo.

Descripción de los componentes se describe en la tabla 19:

a) Dren tipo media espina:

Tabla 19. Datos de drenes.

Canales excavados en el fondo de la celda	
Secundario	0.3 m x0.3 m, a 45° con el ramal principal
Principal	0.6 m x 0.5 m
Relleno con material pétreo D	1 a 2” alrededor de las tuberías
Tuberías en dren secundario	PVC para alcantarillado Tipo B Dint 160 mm perforada
Tuberías en dren principal	PVC para alcantarillado Tipo B Dint. 200 mm perforada
Los drenes estarán protegidos superficialmente y en toda su longitud con geotextil	
Descarga a la cámara con tubería PVC para alcantarillado Tipo B DN 220 mm Dint. 200 mm. L= 3.25 m	

b) Colector de lixiviados: se describe en la tabla 20.

Tabla 20. Colector de lixiviados.

Tramo entre P1 y P9, longitud 95 m
Tubería PVC para alcantarillado Tipo B DN 220 mm Dint. 200 mm
El colector principal descarga a un pozo de revisión con una profundidad de 1.50 m, el cual descarga a un pozo existente de 2m de profundidad.

5.9.2 Parámetros y bases de diseño

La red de drenaje debe posibilitar la evacuación de líquidos al inicio de operación de las celdas, al final del período de diseño y en la etapa de cierre, los caudales considerados para el dimensionamiento de los componentes se describen a continuación:

- Precipitación pluvial sobre el área de la celda al inicio de la operación, condición sin relleno de residuos.

- Lixiviado generado por todo el relleno.
- Aguas de infiltración que podrían ingresar al colector principal, siguiendo un criterio similar al diseño de redes de alcantarillado.

Para los cálculos de los caudales se consideran los métodos siguientes:

a) Caudal de lixiviado

El método suizo, permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o liquido percolado mediante la ecuación:

$$Q= (P*A*K) /t$$

Donde:

Q = Caudal medio de lixiviado o liquido percolado (l/s)
P = Precipitación media anual (mm/año)
A = Área superficial del relleno (m2)
t = número de segundos en el año
K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura
K= 0.50 a 0.25 para rellenos débilmente compactados: 0.4 a 0.7 t/m3
K =0.15 a 0.25 para rellenos fuertemente compactados >0.70 t/m3

b) Caudal de agua lluvia

Se utiliza el Método Racional para calcular el caudal máximo en una sección de escurrimiento dado, mediante este método es:

$$Q = C * I * A/0.36$$

Donde:

Q: Caudal recolectado (l/s)

I: Intensidad de lluvia en (mm/hora)

A: Área de drenaje (ha)

C: Coeficiente de escorrentía (adimensional)

Intensidad de agua lluvia:

La intensidad de la lluvia se calcula a base de las ecuaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia publicadas por el INAMHI para la Estación M0138 Paute y expuestas en la tabla 21.

Tabla 21. Ecuaciones de Intensidad-Duración-Frecuencia Fuente INAMHI.

ESTACIÓN		INTERVALOS DE TIEMPO (minutos)	ECUACIONES	R	R^2
CÓDIGO	NOMBRE				
M0138	PAUTE	5<30	$i = 103.2125 * T^{0.2620} * t^{-0.3919}$	0.9732	0.9472
		30<120	$i = 262.0571 * T^{0.2563} * t^{-0.6679}$	0.9779	0.9563
		120<1440	$i = 719.77 * T^{0.2543} * t^{-0.8795}$	0.9939	0.9878

Donde:

i: Intensidad en mm/h

T: Período de retorno

t: Tiempo de concentración

Tiempo de concentración:

El tiempo de concentración (tc) se determina aplicando el método de Kerby, con la expresión siguiente:

$$t_c = K(l * n)^{0,467} S^{-0,235}$$

Donde:

L: Longitud del canal (pies)

n: Coeficiente de rugosidad del cause

S: Pendiente promedio del cauce principal (pies/pies)

t_c: Tiempo de concentración (min)

c) Caudal de infiltración de alcantarillado

El caudal de infiltración es la cantidad de agua que ingresa al interior de un colector a través de juntas defectuosas. Se utiliza un valor de 0.03 l/s/km

d) Los caudales obtenidos en los cálculos hidráulicos para la red de drenaje.

- Q lixiviados: 0.26 l/s
- Q lluvia: 47.58 l/s
- Q infiltración: 0.3 l/s

5.9.3 Drenes para lixiviados

El dimensionamiento de los drenes principales se sustenta en la ecuación para canales en un medio granular en su interior propuesta por Wilkins, con la ecuación siguiente:

$$v = 52.45 \times P \times R^{0.5} \times I^{0.25}$$

$$R = P \times Ds / [6 \times (1-P)]$$

Donde:

v: Velocidad media en cm/s

P: Porosidad del medio granular, valor entre 0.4 y 0.5

R: Radio hidráulico en cm

I: Pendiente del dren en m/m

Ds: Diámetro equivalente del material granular en cm

Para el diseño se asumen los siguientes valores:

- P= 45%
- Ds= 5 cm
- Área de aporte hidráulico= 0.7856 ha.
- Pendiente del dren principal= 2.5%

Aplicando las ecuaciones y parámetros se obtienen los resultados siguientes:

$$R= (0.45 \times 5) / [6(1-0.45)]= 0.68 \text{ cm}$$

$$v= 52.45 \times 0.45 \times 0.68^{0.5} \times 0.01^{0.25}= 6.2 \text{ cm/s} = 0.062 \text{ m/s}$$

Si el caudal de lixiviado en una zanja es 0.26 l/s 0.00026 m3/s, el área necesaria para el drenaje es:

$$A= Q/v = 0.00026/0.062= 0.004193 \text{ m}^2$$

El área asumida para el canal del dren es de 0.30 m2 (sección 60 x 50 cm) y, asumiendo que se reduce en proporción similar a la porosidad (45%), el área efectiva será 0.135 m2, valor superior al requerido en el cálculo.

La tubería propuesta para el dren principal tiene un diámetro interior de 200 mm y un área de 0.0227 m2, valor que cubre la necesidad de área requerida según el cálculo.

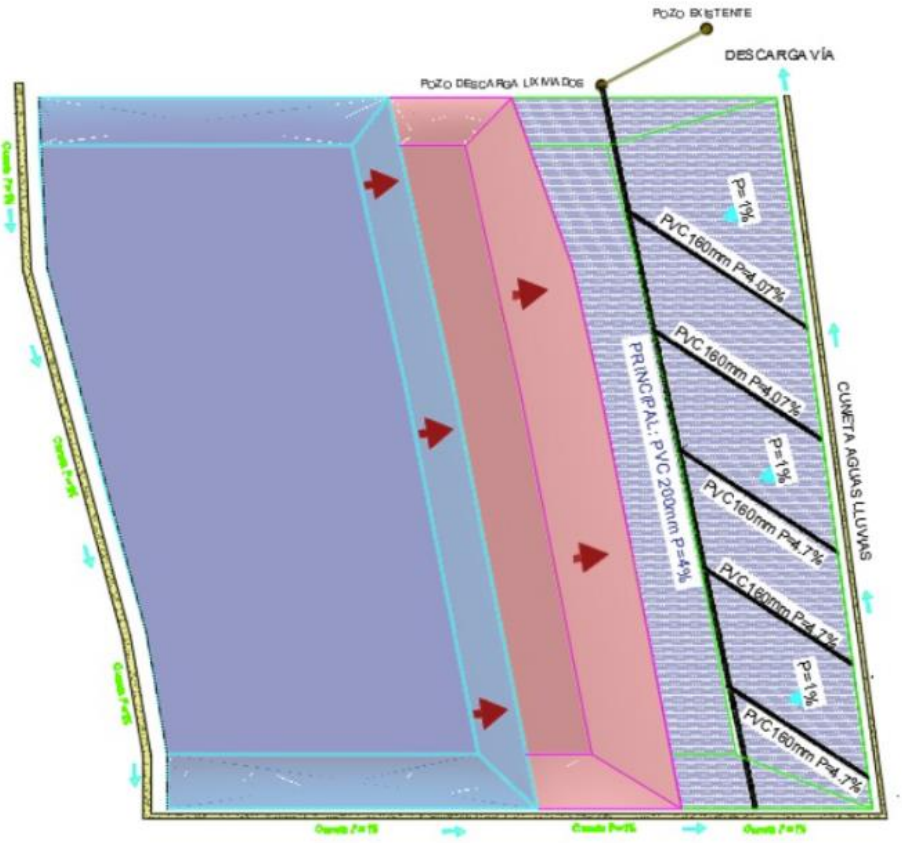
El dimensionamiento propuesto para el dren permite garantizar su funcionamiento por las razones siguientes:

- El dren conduce un líquido con alto contenido orgánico
- El lixiviado genera gases que necesitan espacio para evacuarse
- Se previene la posibilidad de obstrucción

En los ramales secundarios del dren el canal es de 30 x 30 cm y la tubería tiene un diámetro interior de 160 mm, las dimensiones superan los requerimientos del cálculo; sin embargo, permiten garantizar el funcionamiento del drenaje de lixiviados.

La ilustración 18, presenta la estructura transversal de un dren principal.

Ilustración 18. Dren principal.



5.9.4 Colector de lixiviados

El lixiviado recolectado por el dren de la celda se descarga en la cámara de revisión del colector para conducirlo hacia la cámara de tratamiento de humedales artificiales.

El diseño hidráulico del colector se basa fundamentalmente en la resolución de la ecuación de movimiento para conductos cerrados trabajando parcialmente llenos, es decir, con la presencia de una superficie en contacto con la atmósfera o superficie libre.

Se aplica la ecuación de Manning:

$$v = \frac{R^{2/3} S_0{}^{1/2}}{n}$$

Donde:

v: Velocidad
R: Radio hidráulico
S_0: Pendiente
n: Coeficiente de fricción 0.011 para PVC

Velocidad mínima de auto limpieza: 0.45 m/s (Norma SENAGUA)

Relación máxima entre calado/diámetro: 0.75 (Norma SENAGUA)

El colector se diseña para los caudales siguientes:

- Lixiviado: 0.26 l/s por cada zanja del relleno
- Infiltración: 0.3 l/s en todo el colector

Se verifica o comprueba el funcionamiento para la evacuación de agua lluvia, condición al inicio de la operación de cada zanja. Caudales de diseño:

- Agua lluvia: 47.58 l/s
- Infiltración: 0.3 l/s en todo el colector

Los cálculos hidráulicos para el colector de lixiviados se presentan en el Anexo No. 5.

5.10 Tratamiento de lixiviados

5.10.1 Caracterización del lixiviado

La caracterización del lixiviado se realizó mediante el análisis de una muestra tomada en el actual relleno sanitario ubicado en el sector de San Cristobal, el día 30 de septiembre de 2025.

Los resultados de los análisis de laboratorio se incluyen en el Anexo No. 2, donde, al compararlos con los máximos permisibles de la normativa vigente, en la tabla 22, se observa que los siguientes parámetros no cumplen.

Tabla 22. Resultados del análisis de lixiviados.

Demanda Bioquímica de Oxigeno 5: Limite permisible (100 mg/L)	Concentración muestra: 186,95 mg/l (No cumple)
Demanda Química de Oxígeno (DQO): Límite permisible 200 mg/l	Concentración muestra: 378,9 mg/l (No cumple)

Parámetros observados anteriormente en el relleno sanitarios:

- En el relleno sanitario del cantón Paute el lixiviado de una muestra del 20 de enero del 2017 presentó concentraciones de 135 y 436 mg/l para la DBO5 y DQO, respectivamente. La relación DBO5/DQO es de 0.31 reflejando que se trata de un lixiviado “Intermedio”.

La muestra de lixiviado fue recolectada a la salida del sistema de tratamiento mediante humedales artificiales, con el propósito de evaluar la calidad del efluente tratado y verificar el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa ambiental vigente.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) es un indicador de la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable presente en el lixiviado. El análisis realizado muestra una concentración de 186,95 mg/L, valor

que supera el límite permisible de 100 mg/L, evidenciando una carga orgánica considerable en el efluente.

De igual forma, la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que representa la cantidad total de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua, presentó un valor de 378,9 mg/L, superando el límite permitido de 200 mg/L, lo cual confirma la presencia de contaminantes orgánicos en el lixiviado.

El lixiviado puede clasificarse según la edad, como indica la tabla 23.

Tabla 23. Caracterización del lixiviado
Fuente: Tratamiento de Lixiviados. Universidad de Chile. 2018.

Tipo de lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 – 10	>10
pH	<6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DBO5/DQO	>0.5	0.1 – 0.5	<0.1
DQO	>15000	5000 – 15000	<5000
N – NH3 (mg/l)	<400	-	>400
Metales pesados (mg/l)	>2	<2	<2

5.10.2 Procesos de tratamiento

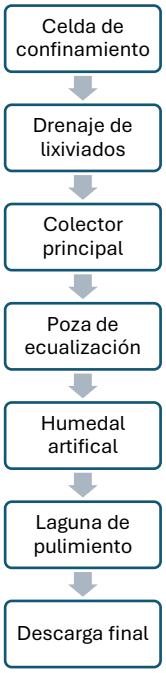
Los lixiviados generados en las celdas del relleno sanitario son captados mediante un sistema de drenaje compuesto por tuberías perforadas instaladas sobre una capa de material granular, las cuales conducen el líquido hacia un colector principal que transporta el flujo hacia el sistema de tratamiento.

Posteriormente, los lixiviados son conducidos hacia una poza de ecualización donde se regula el caudal y se homogeniza la carga contaminante, permitiendo la sedimentación de sólidos suspendidos y la reducción inicial de materia orgánica.

El humedal artificial utiliza plantas macrófitos (totora, junco, jacinto de agua, etc), microorganismos y sustratos filtrantes para eliminar contaminantes.

El humedal funciona como se indica en el esquema de la ilustración 19:

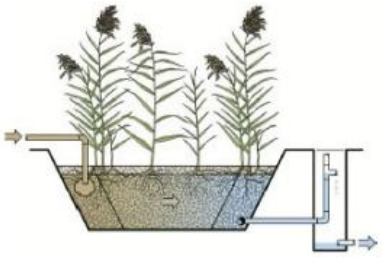
Ilustración 19. Esquema de procesos del humedal artificial.

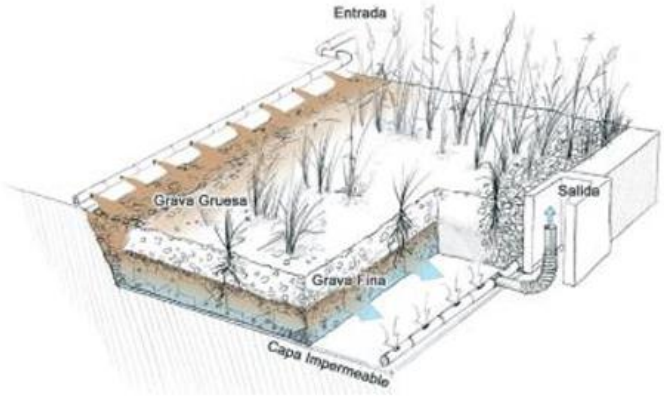


Los humedales remueven alrededor del 70-90% de DBO, 60-80% de DQO, Solidos suspendidos en un 80-90% y Nitrógeno en un 40-70%.

El humedal artificial, representado en la ilustración 20, es de flujo subsuperficial horizontal y funciona como se presenta en el esquema:

Ilustración 20. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal.





El humedal artificial se encuentra actualmente en operación; sin embargo, los resultados de DBO_5 y DQO del efluente (Tabla 2 y Tabla 22) muestran que su desempeño no es suficiente para cumplir los límites de descarga. Además, con la implementación de nuevas celdas aumenta el caudal de lixiviado que llega al colector, y se debe tener presente que estos sistemas son recomendados para rellenos pequeños o medianos con producciones menores a 50 ton/día.

5.10.3 Capacidad hidráulica del humedal artificial

El humedal artificial cuenta con características constructivas propias, tiene una impermeabilización con doble capa de geomembrana de polietileno de alta densidad de 1 mm de espesor, sus dimensiones son expuestas en la tabla 24.

Tabla 24. Dimensiones del humedal artificial

Las dimensiones del humedal artificial son:	
Ancho mayor:	10.05 m.
Ancho menor (base):	9.00 m
Largo mayor:	32.21 m.
Largo menor (base):	31.00 m.
Altura útil:	1.36 m.

Estimación teórica de la capacidad hidráulica y del tiempo de retención

Para estimar el tiempo de retención hidráulica del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se utilizaron sus dimensiones geométricas, el caudal calculado de lixiviados y una porosidad teórica del material filtrante. La U.S. Environmental Protection Agency recomienda una porosidad de 0,35 para humedales subsuperficiales con material granular y vegetación. Este parámetro representa la fracción del volumen del lecho disponible para el flujo, debido a que el espacio restante está ocupado por el sustrato y las raíces.

Tabla 25. Cálculo teórico de la capacidad hidráulica del humedal

	Cálculo	**Resultado**
Ancho promedio	(10,05 + 9,00) / 2	9,525 m
Longitud promedio	(32,21 + 31,00) / 2	31,605 m
Área superficial aproximada	9,525 × 31,605	301,04 m²
Altura útil	Dato de la Tabla 24	1,36 m
Volumen geométrico	301,04 × 1,36	409,41 m³
Porosidad teórica	Valor asumido para lecho plantado	0,35
Volumen hidráulico útil	409,41 × 0,35	143,29 m³
Caudal de lixiviados	0,26 L/s × 86,4	22,46 m³/día
Retención con lixiviados	143,29 / 22,46	6,38 días
Caudal con infiltración	(0,26 + 0,30) L/s × 86,4	48,38 m³/día
Retención con infiltración	143,29 / 48,38	2,96 días
Carga hidráulica con lixiviados	22,46 / 301,04	0,075 m/día
Carga hidráulica con infiltración	48,38 / 301,04	0,161 m/día

El humedal dispone de un volumen hidráulico útil teórico de 143,29 m³. Considerando únicamente el caudal medio de lixiviados de 0,26 L/s, el tiempo de retención es aproximadamente 6,38 días. Si se incluye el caudal de infiltración estimado para el colector, disminuye a aproximadamente 2,96 días.

Estos resultados componen una estimación teórica. El tiempo efectivo puede disminuir por acumulación de sólidos, crecimiento de raíces, obstrucción del material filtrante y formación de caminos preferenciales. Se recomienda medir los caudales de entrada y salida y verificar en campo la porosidad y el nivel de saturación del lecho.

El caudal máximo de agua lluvia de 47,58 L/s no se incorpora directamente al cálculo porque corresponde a un evento temporal que debe regularse en la poza de ecualización o en el tanque de tormentas antes de ingresar al humedal. Su descarga directa produciría una sobrecarga hidráulica y reduciría el tiempo de retención.

No se dispone de las dimensiones ni de los volúmenes útiles de la poza de ecualización y de la laguna de pulimiento, por lo que no es posible determinar su tiempo de retención individual; estos datos deberán levantarse en campo para completar la comprobación de todo el tren de tratamiento.

Para que el efluente cumpla los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce (DBO_5 ≤ 100 mg/L y DQO ≤ 200 mg/L), según los resultados de laboratorio (Tabla 2 y Tabla 22) se requiere una remoción adicional de entre 32 % y 47 % de DBO_5 y de entre 47 % y 49 % de DQO respecto al efluente actual. La relación DBO_5/DQO del efluente (0.37 a 0.49) indica que la materia orgánica remanente es, en buena parte, biodegradable, por lo que las medidas

biológicas y operativas que se proponen a continuación son técnicamente adecuadas para alcanzar dicha remoción.

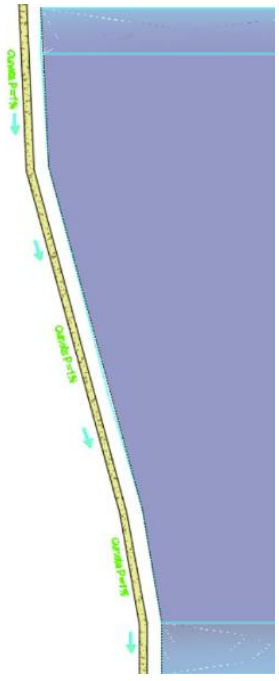
A nivel de prefactibilidad, se propone como alternativa de mejora: (i) regular el caudal de agua lluvia mediante un tanque de tormentas o una poza de ecualización con vertedero de alivio; (ii) incorporar un tratamiento primario (sedimentador o reactor UASB) antes del humedal para reducir la carga de sólidos y materia orgánica; (iii) rehabilitar el humedal mediante retiro de lodos, manejo de la vegetación, renovación del material filtrante en la zona de entrada y mejora de la distribución del caudal, evaluando su conversión a un sistema híbrido de flujo vertical y horizontal; (iv) mantener la laguna de pulimiento con desinfección final si se requiere; (v) recircular una parte del lixiviado hacia las celdas mediante el tanque de recirculación previsto en la implantación (Anexo 4), lo que reduce el caudal y la carga orgánica que llegan al humedal; y (vi) implementar un monitoreo periódico del afluente y del efluente del humedal para verificar la eficiencia de remoción y el cumplimiento normativo. La selección y el dimensionamiento de estas alternativas dependerán de los resultados de aforo, de los ensayos y de la caracterización fisicoquímica y microbiológica en cada etapa del tren de tratamiento.

5.11 Cunetas de aguas lluvias

El área para la disposición final de los residuos sólidos está rodeada por una vía lastrada para la circulación de los vehículos recolectores, como parte de esta vía se construirán cunetas para la evacuación de las aguas lluvias, por tanto, servirán también para interceptar la escorrentía pluvial evitando su ingreso al área del relleno.

En la ilustración 21, se aprecia la implantación de la infraestructura vial interna y las cunetas.

Ilustración 21. Cunetas para aguas lluvias



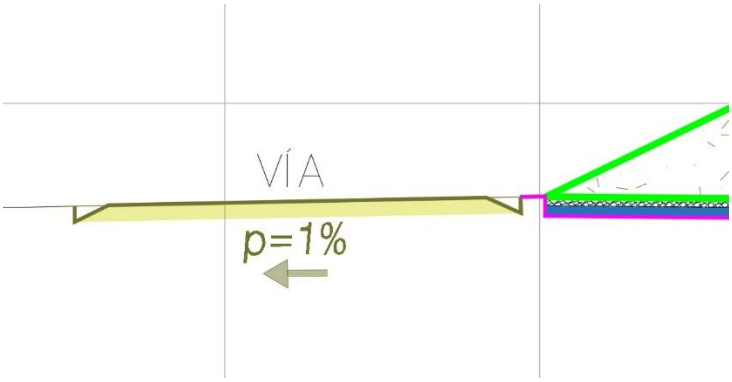
Las cunetas están dispuestas en dos ramales que forman una “L” que descargan en la cuneta de la vía principal. Las características se indican a continuación, en la tabla 26:

Tabla 26. Características de cunetas.

Vía de acceso:	
Tipo de calzada:	Lastre
Ancho:	6 m
Longitud:	240 m
Pendiente transversal de la calzada 1%	
Cunetas:	
Superficie sin recubrimiento	
Sección triangular	
Pendiente longitudinal:	0.15%
l1=	0.3 m
l2=	0.7 m
h variable entre 0.2 y 0.5 m	

En la ilustración 22, se presenta la sección transversal de la vía y cuneta.

Ilustración 22. Sección transversal de la calzada



5.12 Impermeabilización de las superficies

Las superficies del relleno sanitario (canales de drenaje de lixiviados) serán impermeabilizadas con la finalidad de evitar la contaminación de las aguas subterráneas con el percolado o lixiviado y permitir su escurrimiento hacia el sistema de drenaje.

El material que se utilizará es la geomembrana de polietileno de alta densidad de 1mm (ver Anexo 6). Para proteger la geomembrana se usará geotextil que será del tipo “No tejido, punzonado por agujas” con una fuerza última o resistencia al punzonamiento de mínimo 75,14 Newtons de acuerdo con la prueba ASTM D 4833 o similares. Además, el geotextil deberá cumplir con los requisitos y especificaciones mínimas establecidos por el Instituto de Investigaciones Geosintéticas (GRI).

Encima de la geomembrana deben ser colocados neumáticos para minimizar el efecto de punzonamiento y una capa de material de sitio para minimizar el impacto durante la operatividad de la maquinaria, esto será como se indica en la ilustración 23.

Ilustración 23. Capas de impermeabilización de la celda.



5.13 Análisis de estabilidad de taludes

La ampliación del relleno sanitario de Paute se proyecta sobre residuos previamente dispuestos. Por ello, la estabilidad depende tanto del suelo de fundación como del comportamiento del relleno antiguo y de las cargas de las nuevas terrazas. En este apartado se desarrolla una evaluación teórica con geometría referencial y parámetros adoptados a partir de estudios previos y bibliografía. Su finalidad es establecer cómo se evaluará la estabilidad y qué información se necesita para conocer el comportamiento real del conjunto.

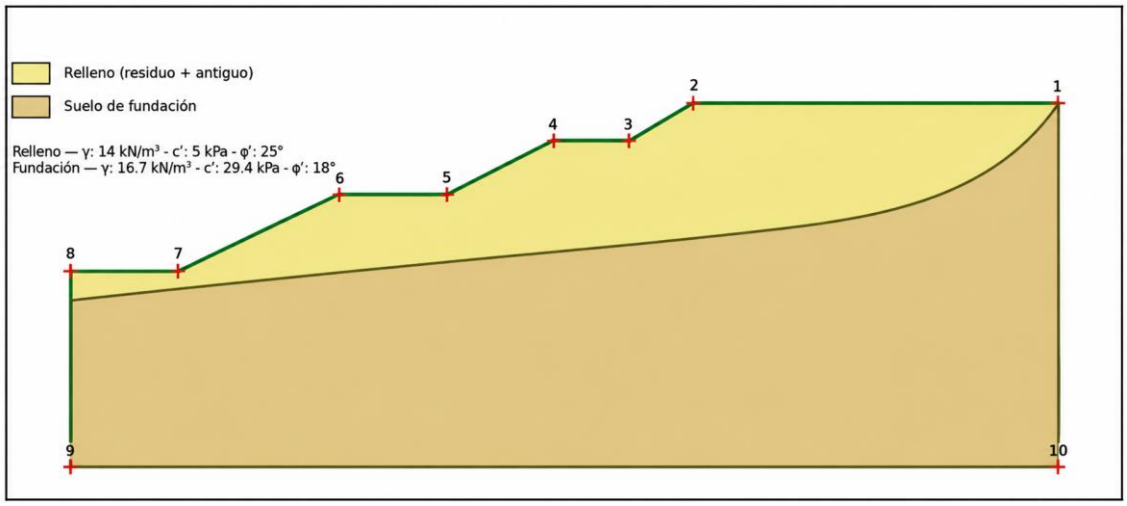
5.13.1 Configuración de la ampliación

La propuesta comprende tres terrazas con alturas promedio de diseño de 3, 5 y 6 m, de acuerdo con la configuración descrita para el Perfil A, citado en el Anexo 4. Como la ampliación se apoya sobre un relleno ya conformado, las pendientes varían a lo largo del proyecto. Se adopta una inclinación máxima de 2H:1V para los taludes exteriores: dos unidades de distancia horizontal por cada unidad de altura, equivalentes a aproximadamente 26,6° respecto de la horizontal. La pendiente global del conjunto incorpora las bermas y se diferencia de la inclinación de cada talud.

La configuración se presenta en la ilustración 24. La región superior representa conjuntamente los residuos antiguos, los residuos proyectados y los materiales de cobertura; la región inferior

corresponde al suelo de fundación. El contacto entre ambas regiones se idealiza mediante una superficie ascendente de inclinación variable. El esquema es referencial y no está dibujado a escala; las alturas, las pendientes y la posición de ese contacto deben verificarse mediante un perfil acotado y una investigación del terreno.

Ilustración 24. Configuración referencial y parámetros adoptados para el análisis teórico de estabilidad.



5.13.2 Parámetros adoptados y fundamento bibliográfico

Para describir cada material se utilizan el peso unitario (γ), la cohesión (c′) y el ángulo de fricción interna (φ′). El peso unitario permite estimar las cargas que genera el material, mientras que la cohesión y la fricción representan su resistencia al deslizamiento en el modelo. Para el suelo de fundación se mantiene el conjunto recomendado para diseño por CIMENTEST Ingeniería y Proyectos Cía. Ltda. (2013), adoptado en la sección 5.1.4.7 y la Tabla 5: γ = 16,7 kN/m³, c′ = 29,4 kPa y φ′ = 18°. Los resultados de la muestra B-1 se conservan como antecedentes y no se mezclan con estos parámetros de diseño.

Para el cuerpo del relleno se adoptan γ = 14 kN/m³, c′ = 5 kPa y φ′ = 25°. Estos valores son hipótesis de trabajo, debido a la falta de ensayos representativos sobre los residuos existentes. Considerar el relleno como un solo material simplifica las diferencias de composición, humedad, edad y compactación que pueden existir entre las capas antiguas, las nuevas capas y los materiales de cobertura.

El peso unitario se contrastó con Zekkos et al. (2005), quienes recopilan mediciones in situ desde aproximadamente 5 hasta más de 18 kN/m³ y explican su variación en función de la composición, la compactación, el suelo de cobertura y la profundidad. El valor de 14 kN/m³ se encuentra dentro de estos antecedentes, por lo que se utiliza como una aproximación para el conjunto modelado. Su pertenencia al intervalo publicado no demuestra que sea representativo del relleno de Paute.

Para la resistencia al corte se tomó como referencia comparativa a Bray et al. (2009), quienes proponen una envolvente con cohesión de 15 kPa y ángulo de fricción de 36° a un esfuerzo normal de aproximadamente 101 kPa. En esa envolvente, el ángulo disminuye 5° cuando el esfuerzo normal aumenta diez veces. La recomendación corresponde a residuos con humedad

inferior a su capacidad de campo y no puede trasladarse directamente a cualquier condición del sitio.

Los valores seleccionados de 5 kPa y 25° representan una hipótesis de menor resistencia respecto de esa referencia en la condición de esfuerzos indicada. Constituyen una elección del presente análisis, no una recomendación específica de los autores ni un límite inferior demostrado para los residuos locales. Su influencia deberá comprobarse mediante un análisis de sensibilidad, variando los parámetros para observar cómo cambia el factor de seguridad.

El peso unitario de 14 kN/m³ no equivale a la densidad de 800 kg/m³ utilizada para calcular el volumen de residuos nuevos, que corresponde aproximadamente a 7,85 kN/m³. Son hipótesis distintas sobre el material considerado en cada evaluación. Su compatibilidad deberá revisarse con datos del sitio, especialmente si se representan por separado los residuos antiguos, los nuevos y la cobertura.

5.13.3 Criterio e interpretación de la estabilidad

Para la verificación numérica se propone el método de equilibrio límite de Bishop, disponible en el módulo SLOPE/W de GeoStudio, con el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb. El método permite buscar superficies circulares de deslizamiento y calcular su factor de seguridad. La búsqueda debe considerar fallas locales de una terraza y fallas globales que involucren varias terrazas y el suelo de fundación.

El factor de seguridad relaciona la resistencia disponible con la necesaria para mantener el equilibrio. Para la condición estática se adopta como referencia de comparación FS ≥ 1,50, aplicado al menor factor obtenido en la búsqueda. Este valor toma como orientación el indicado por el U.S. Army Corps of Engineers (2003) para condiciones normales de carga a largo plazo; el mismo manual señala que su selección debe considerar la incertidumbre de los parámetros y las consecuencias de una falla. Se utiliza aquí como criterio del análisis teórico y no como una garantía independiente de las condiciones del sitio.

Un factor de seguridad mínimo igual o superior a 1,50 indicaría que el escenario calculado cumple el criterio estático adoptado; un valor inferior indicaría que no alcanza ese margen. Si el cálculo utiliza parámetros referenciales, su resultado describirá únicamente la estabilidad teórica bajo las hipótesis evaluadas. Para la geometría presentada todavía no se dispone de factores de seguridad calculados. En consecuencia, la estabilidad de la ampliación permanece sin verificar.

La ampliación introduce cargas adicionales sobre un relleno antiguo de propiedades inciertas. Además, las acumulaciones de lixiviados pueden aumentar la presión del líquido entre las partículas, denominada presión de poro, y reducir la resistencia disponible. La ausencia de una línea de agua en el dibujo no permite asumir que estas presiones sean nulas. La notación c′ y φ′ se mantiene como formulación adoptada, cuya compatibilidad con las condiciones de drenaje debe comprobarse. Los posibles deslizamientos sobre la geomembrana requieren una evaluación específica de la resistencia de sus interfaces y de mecanismos no circulares.

5.13.4 Estudios complementarios y alcance de la evaluación

Para evaluar el comportamiento real del relleno se necesita un levantamiento topográfico que defina alturas, pendientes, bermas y espesores, junto con una investigación de la base de los residuos y del suelo de fundación. También se requiere determinar la composición, humedad, densidad y resistencia al corte de los residuos, diferenciando los materiales antiguos de los proyectados cuando corresponda.

La evaluación debe incorporar mediciones de niveles de lixiviados, revisión del drenaje, seguimiento de asentamientos y desplazamientos, y ensayos de resistencia de las interfaces con la geomembrana. Con esta información se deberán efectuar cálculos para las etapas de llenado, las sobrecargas operativas y los escenarios estáticos y sísmicos pertinentes, además de analizar la sensibilidad a cambios en los parámetros y las condiciones hidráulicas.

El aporte de este apartado es establecer una base teórica y un criterio de evaluación para la ampliación. Las pendientes y los parámetros adoptados permiten formular el modelo, pero la comprobación de la estabilidad requiere completar los cálculos y contrastar sus hipótesis con los estudios del sitio. Solo a partir de esa información podrá emitirse un criterio sustentado sobre el comportamiento real del relleno y la viabilidad geotécnica de la configuración propuesta.

5.14 Material de cobertura

Para la cobertura diaria de las celdas, el material se obtendrá de dos bancos ubicados dentro del relleno sanitario, uno ubicado al norte del relleno que se puede observar en la ilustración 25 y otro en el sur (ver Anexo 4).

Ilustración 25. Banco de material de cobertura



5.15 Manejo de gases

El manejo de gases se realizará mediante chimeneas que permiten la evacuación controlada del biogás generado por la descomposición anaerobia de los residuos enterrados.

Funciona por la diferencia de presión y convección natural, evitando que los gases se acumulen en el interior del relleno evitando explosiones, migración lateral de gases y emisión descontrolada de olores.

Existen diferentes tipos de chimeneas, entre ellas se encuentran:

Chimeneas pasivas: Estas no requieren equipos mecánicos y funcionan por ventilación natural, estas son ideales para aquellos rellenos que no tienen gran generación de biogás. Estas fueron usadas en la implantación del proyecto.

Chimeneas activas: Estas incorporan la extracción mediante bombas, se usan en rellenos grandes con aprovechamiento energético, pero tienen un alto costo y complejidad. En la ilustración 26 se expone la implantación de chimeneas.

Ilustración 26. Implantación de chimeneas

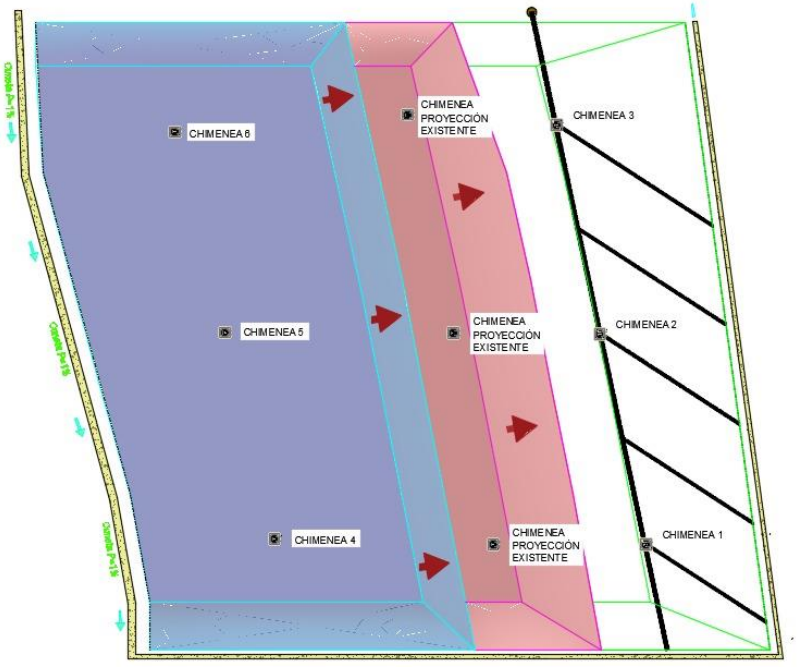
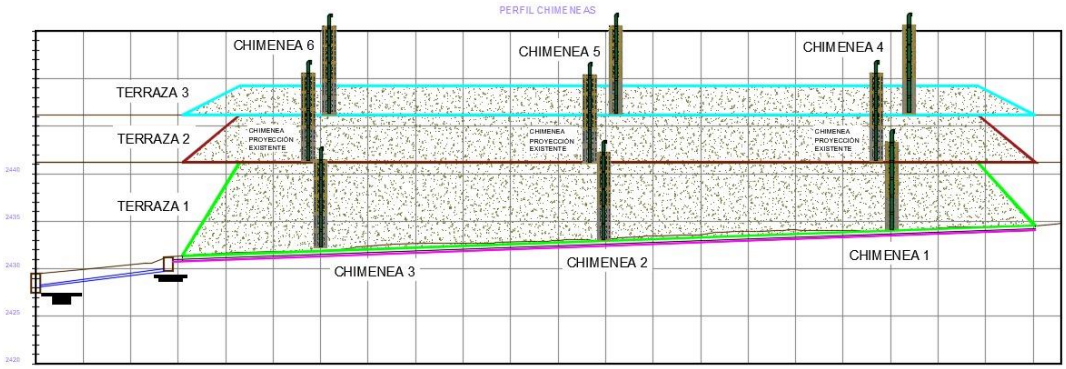


Ilustración 27. Perfil chimeneas


PERFIL CHIMENEAS
CHIMENEA 6
CHIMENEA 5
CHIMENEA 4
TERRAZA 3
TERRAZA 2
TERRAZA 1
CHIMENEA PROYECCION EXISTENTE
CHIMENEA PROYECCION EXISTENTE
CHIMENEA PROYECCION EXISTENTE
CHIMENEA 3
CHIMENEA 2
CHIMENEA 1

6. Discusión

El análisis integral del relleno sanitario del cantón Paute evidencia que su problemática no responde a un único factor, sino a la interacción de variables técnicas, operativas y sociales que han condicionado su desempeño actual.

La generación de residuos sólidos, estimada en 10.07 toneladas diarias, resulta coherente con la producción per cápita de 0.51 kg/hab/día. Sin embargo, al contrastar este valor con la cobertura del servicio del 65%, se entiende que existe una fracción significativa de residuos que no ingresa al sistema formal de gestión, lo cual coincide con lo señalado en el diagnóstico del PDOT, donde se evidencian prácticas como quema, disposición en quebradas y enterramiento. Esto implica que la carga real de residuos generados en el cantón es superior a la gestionada, lo que distorsiona la planificación operativa del relleno.

El alto porcentaje de materia orgánica en los residuos (70 %) favorece la generación de lixiviados con una carga orgánica importante. Los valores de DBO_5 (146,22 mg/L) y DQO (392,02 mg/L) evidencian que el efluente del sistema de tratamiento mediante humedales artificiales no cumple con los límites considerados en esta investigación. Este incumplimiento podría relacionarse con el ingreso de aguas lluvias y de infiltración, que incrementaría el caudal y reduciría el tiempo de retención hidráulica, limitando el contacto del lixiviado con el medio filtrante y los microorganismos responsables de la degradación. Asimismo, una posible obstrucción del lecho podría disminuir la eficacia del tratamiento, mientras que la presencia de compuestos de difícil biodegradación contribuiría a mantener elevada la DQO. Estas posibles causas requieren verificarse mediante mediciones de caudal, análisis de entrada y salida e inspección del humedal.

Para el análisis teórico de estabilidad se adoptaron dos regiones con propiedades diferenciadas: el suelo de fundación, con un peso unitario de 16,7 kN/m³, una cohesión de 29,4 kPa y un ángulo de fricción de 18°, correspondientes a los valores de diseño de CIMENTEST (2013); y el cuerpo del relleno, con un peso unitario de 14 kN/m³, una cohesión de 5 kPa y un ángulo de fricción de 25°. Estos últimos constituyen hipótesis de modelación contrastadas con antecedentes bibliográficos, debido a la ausencia de ensayos específicos sobre los residuos existentes. Asimismo, se consideraron pendientes variables que no superan 2H:1V. La incertidumbre sobre la compactación del relleno antiguo y las posibles acumulaciones de lixiviados limita la representatividad de esta aproximación. Por tanto, los parámetros adoptados permiten formular el análisis teórico, pero la evaluación del comportamiento real requiere caracterización geotécnica, verificación de las condiciones hidráulicas y cálculos de estabilidad sustentados en información del sitio.

La operación del relleno sanitario refleja deficiencias importantes, tales como la ausencia de pesaje, falta de registro histórico de residuos, falta de maquinaria especializada y manejo limitado del biogás. Estas condiciones reflejan un sistema que opera deficientemente, lo cual afecta directamente en la eficiencia de compactación y, por ende, en la reducción prematura de la vida útil del relleno.

Frente a estas limitaciones, la propuesta de utilizar una retroexcavadora sobre orugas como alternativa de compactación es técnicamente funcional con respecto a las restricciones presupuestarias. Si bien no sustituye a un compactador especializado, permite mejorar la densificación de los residuos (800 kg/m³), lo que representa un gran avance respecto a la condición actual.

Por otro lado, el método de vaguada es la alternativa más adecuada dadas las condiciones topográficas del sitio. La conformación de terrazas optimiza el espacio disponible; sin embargo, el volumen calculado (41.565 m³) cubre el 78.2 % del volumen requerido para el período de diseño (52,266 m³), lo que equivale a una vida útil aproximada de 7 años; por tanto, la solución propuesta prolonga la operación del relleno, pero no cubre la totalidad del período de diseño de 10 años.

Finalmente, el análisis realizado demuestra que la problemática del relleno sanitario de Paute no solo la falta de infraestructura, sino que responde a una ausencia de gestión integral, donde factores como la baja recuperación de residuos, la limitada educación ambiental y la falta de control operativo inciden directamente en su desempeño.

7. Conclusión

El diagnóstico técnico evidenció que el relleno sanitario de Paute se encuentra en operación y cuenta con infraestructura básica (geomembrana, drenaje de lixiviados, humedal artificial, chimeneas y vías internas), pero opera con limitaciones técnicas: no dispone de báscula ni de registros de ingreso, no realiza compactación técnica, la cobertura diaria presenta espesores variables entre 0.10 m y 0.38 m y no existe medición ni quema del biogás. Estas condiciones han reducido la eficiencia en el uso del volumen disponible y la vida útil del sitio.

La generación estimada de 10.07 toneladas diarias, con una producción per cápita de 0.51 kg/hab/día y una cobertura de recolección del 65 %, indica que una fracción importante de los residuos del cantón no ingresa al sistema formal de gestión, lo que genera impactos ambientales fuera del relleno sanitario.

Los principales riesgos técnicos identificados son: (i) ambiental, por el incumplimiento de DBO_5 (146.22 y 186.95 mg/L frente a 100 mg/L) y DQO (392.02 y 378.9 mg/L frente a 200 mg/L) en el efluente del humedal, asociado a la fracción orgánica del 70 %; (ii) geotécnico, por la incertidumbre sobre las propiedades de los residuos antiguos, la geometría del contacto con la fundación y las presiones de lixiviados; el análisis teórico no permite asignar factores de seguridad ni identificar una terraza crítica; y (iii) sanitario, por la presencia de vectores y la cobertura irregular. Las causas estructurales se relacionan con la capacidad del sistema de tratamiento de lixiviados y la falta de información geotécnica del relleno antiguo, mientras que las causas operativas corresponden a la ausencia de compactación, pesaje, control de cobertura y maquinaria dedicada.

La evaluación de viabilidad identificó que mantener el relleno sanitario de Paute en su ubicación actual constituye la alternativa preferente frente a su relocalización, considerando criterios técnicos, ambientales, sociales, económicos y administrativos. El análisis multicriterio (Anexo 9) identificó únicamente zonas aptas escasas, pequeñas y dispersas, y los dos puntos aptos que se evaluaron no se consideran viables en esta etapa, uno por tener una superficie continua menor a 7 ha y el otro por no contar con un acceso desde la vía principal. En cambio, el emplazamiento actual dispone de terreno municipal de 7 ha, acceso vial e infraestructura instalada. Además, cuenta con los permisos y la licencia ambiental para su funcionamiento, lo que representa una ventaja administrativa importante y fortalece la conveniencia de mantener la misma localización. No obstante, la continuidad y la ampliación requieren corregir las deficiencias operativas identificadas, verificar las condiciones de estabilidad y cumplir los requisitos técnicos y ambientales correspondientes.

El volumen disponible para la ampliación mediante el método de vaguada es de 41.565 m^3, distribuido en tres terrazas. La vida útil efectiva dependerá del asentamiento real de los residuos y del volumen adicional que este permita aprovechar. Un asentamiento mayor al considerado en el dimensionamiento podría prolongarla, mientras que uno menor podría reducirla respecto de la estimación inicial. Si la capacidad disponible resulta insuficiente para cubrir el período de diseño,

será necesario evaluar la habilitación de áreas adicionales dentro del predio, las cuales no fueron incluidas en el alcance de esta investigación.

El análisis teórico de estabilidad permitió establecer una configuración referencial de la ampliación sobre el relleno existente y definir parámetros geotécnicos de trabajo, considerando pendientes variables con un límite adoptado de 2H:1V. Esta aproximación permitió reconocer la importancia del comportamiento del relleno antiguo, su interacción con el suelo de fundación y la posible influencia de los lixiviados. Sin embargo, la ausencia de información suficiente sobre la compactación y la resistencia de los residuos impide confirmar la estabilidad de la configuración propuesta. Para evaluar su comportamiento real se requiere verificar la geometría mediante topografía, caracterizar los residuos y el suelo de apoyo, determinar las condiciones hidráulicas y efectuar cálculos de estabilidad estática, sísmica y de las interfaces con la geomembrana. Estos estudios permitirán contrastar las hipótesis adoptadas y sustentar la viabilidad geotécnica de la ampliación.

Las alternativas de mejora propuestas, en orden de prioridad, son: (1) optimizar el tratamiento de lixiviados mediante la regulación del agua lluvia, la incorporación de un tratamiento primario, la rehabilitación del humedal, la recirculación de lixiviados y el monitoreo del afluente y del efluente, para alcanzar una remoción adicional de hasta 47 % de DBO_5 y 49 % de DQO; (2) implementar la compactación con retroexcavadora sobre orugas, en capas de 0.60 m y con 4 a 6 pasadas, para alcanzar densidades de hasta 800 kg/m³, solución técnicamente aceptable dentro del margen económico del GAD Municipal; (3) ampliar el relleno mediante el método de vaguada en tres terrazas; y (4) implementar pesaje, registros diarios y control del espesor de cobertura.

La sostenibilidad del sistema de disposición final no solo depende de mejoras técnicas, sino de la implementación de estrategias de gestión integral, como la reducción en la fuente, el reciclaje y la educación ambiental. Por lo que, el GAD debe implementar nuevas técnicas que permitan establecer un nuevo sitio de disposición final, dado que este estudio ha demostrado que tras la mejora operativa el relleno actual tiene un tiempo muy limitado de operatividad.

En cuanto al análisis multicriterio, los puntos A y B se encuentran dentro de zonas aptas y cumplen con los cinco criterios evaluados, pero en esta etapa preliminar no se consideran viables por la superficie insuficiente del sitio A y la falta de accesibilidad del sitio B. Sin embargo, esto no quiere decir que se descarte por completo la posibilidad de implantar un relleno sanitario en estas zonas, ya que el análisis se realizó por puntos y con información a escala cantonal. Por lo que, para tener seguridad de emplazar el relleno sanitario en alguno de estos sitios se requiere realizar más estudios, como levantamientos topográficos de detalle, estudios geotécnicos e hidrogeológicos, la verificación del uso del suelo y de la tenencia de los predios, el diseño de una vía de acceso y la socialización con la población cercana.

8. Referencias

Arévalo Durazno, M. B., Moreira Mendieta, P. S., & Patiño Orellana, A. I. (2021). *Análisis de asentamientos y estabilidad de taludes de la fase dos del relleno sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca* [Tesis de grado, Universidad del Azuay].

Arias, C. (2004). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 17–24.

Bray, J. D., Zekkos, D., Kavazanjian, E., Jr., Athanasopoulos, G. A., & Riemer, M. F. (2009). Shear strength of municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135*(6), 709–722. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000063

Canelo, C. (2021). Criterios y métodos para seleccionar la ubicación de los rellenos sanitarios. *Revista de Investigación Agroproducción Sustentable*, 9–19.

Chambillo, H. (2017, 18 de octubre). *Universidad Católica Sedes Sapientiae*. universidadcatolicasedecapientiae.com

CIMENTEST Ingeniería y Proyectos Cía. Ltda. (2013). *Estudio de mecánica de suelos para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos de la ciudad de Paute* (Proyecto PRO-CIM-007.1).

Corredor, L., Gonzales, F., Granja, L., & Guevara, C. (2002, 12 de abril). *Universidad Piloto de Colombia*. universidadpilotodecolombia.com

Di Stefano, A. B. (1996). Settlement of Beddingham landfill. *Engineering Geology of Waste Disposal, 11*, 111–119.

Duque, M., Durango, C., & Carvajal, H. (2004). Propuesta de un método de evaluación multicriterio como herramienta para determinar zonas óptimas de ubicación de rellenos sanitarios utilizando sistemas de información geográfica. *Investigación e Innovación en Ingeniería de Software, 4*, 101–138.

Espejo, A. W. (2018). Localización óptima de un relleno sanitario empleando sistemas de información geográfica distrito de Chachapoyas Amazonas-2017. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería, 1*(3), 71–77. https://doi.org/10.25127/ucni.v1i3.429

Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. http://www.cepis.ops-oms.org

Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE]. (2015). *Acuerdo Ministerial 061: Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Registro Oficial, Edición Especial 316.

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2024). *Sustancias y residuos: Proyecto FOCAME*. https://sustanciasyresiduos.ambiente.gob.ec/proyecto-focame/

Montoya, A. (2012). Caracterización de residuos sólidos. *Cuaderno Activa*, 67–72.

Mosquera, B., & Lara, B. (2012). Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: Revisión del estado del arte. *Revista Tumbaga*, 73–99.

Navarro, D., Lilian, M., & Reyes, V. (2019, 15 de octubre). *Unitec*. www.unitec.com

Ordoñez, C. A., & Villarraga Herrera, M. R. (2005). Asentamientos en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín. *Revista Politécnica*, 57–72.

Ricaldi, J., Huaman, M., & Callupe, N. (2021, 26 de marzo). *Universidad Continental*. universidadcontinental.com

Sáez, A., & Urdaneta G., J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia, 20*(3), 121–135.

Silva, Á., & Zamora, H. (2005, 15 de marzo). *Universidad Nacional de Colombia*. www.universidadnacionaldecolombia.com

Torri, S. (2017, 24 de febrero). *Cedepp*. http://cedepp.org.ar/?p=381

Ullca, J. (2006). Los rellenos sanitarios. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, (4), 2–17.

U.S. Army Corps of Engineers. (2003). *Slope stability* (Engineer Manual EM 1110-2-1902). https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Guidance for design and construction of a subsurface flow constructed wetland*. Region 6.

Zekkos, D. P., Bray, J. D., Kavazanjian, E., Matasovic, N., Rathje, E., Riemer, M., & Stokoe, K. H., II. (2005). Framework for the estimation of MSW unit weight profile. En *Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italia. https://www.geoengineer.org/storage/publication/18928/publication_file/7948/323.pdf

9. Anexos

ANEXO 1. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

746 700 | 746 800 | 746 900 | 747 000 | 747 100

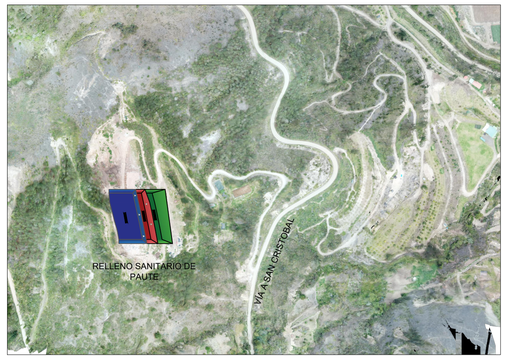
9 688 200 N

9 688 100 N

9 688 000 N

9 687 900 N

UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

	CURVAS CADA 0.50 m
	CURVAS CADA 2.50 m

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:750	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	FECHA: ABRIL DE 2026

ANEXO 2. ANALISIS DE AGUA

ACLAB
LABORATORIO AMBIENTAL

INFORME DE RESULTADOS 2025



Proyecto:

- **PAT2025-234.2**

Presentado para:

- **GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN PAUTE**

0958689461 - 0998156225

informes@aclab.com.ec

www.aclab.com.ec

INFORME DE RESULTADOS DEL MUESTREO DE AGUAS

Información del laboratorio		Información del cliente	
Organización:	ACLAB Asesoría, Consultoría y Laboratorio Ambiental S.A.S. B.I.C.	**Organización:**	Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Del Cantón Paute
Dirección:	Matriz: Sauces del Valle Calle B E20-750 y Calle A – Quito Sucursal: Av. De La Ópera y Bethoven, oficina 103, edificio Montano - Cuenca	**Dirección:**	Av. Simón Bolívar y Rodríguez Parra.
Teléfono:	0958689461 / 0998156225	**Contacto:**	Ing. Oliver Segarra Martínez
Email:	informes@aclab.com.ec	**Número:**	099 930 7291

INFORMACIÓN DEL MUESTREO

Código de proyecto:	PAT2025-234.2	**Responsable del muestreo:**	Wazhingthon Delgado
Código de informe:	PAT2025-234.2-29-MA	**Responsable del análisis:**	Fernando Rojas
Código de plan de muestreo:	PAT2025-234.2-PA02	**Responsable de aprobación:**	Adrián Pachacama
Fecha de muestreo:	1 de diciembre de 2025	**Fecha de emisión:**	19 de diciembre de 2025
Proyecto [A]:	Monitoreo de la calidad de agua potable y residual. De conformidad a los parámetros establecidos en los términos de referencia		
Metodología:	APA-04 / NTE INEN 2176 / NTE INEN 2169 / NTE INEN 2226		

INFORMACIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Equipos	Código interno	Marca	Serie	Certificado de calibración (Descargar)
Multiparámetro (pH)	AIM-27	HANNA	7040285111	Vigente
Turbidímetro	AIM-06	Milwaukee	11005290013	Vigente
Colorímetro de color	AIM-35	HANNA	8110069321	Vigente

INFORME DE RESULTADOS DEL MUESTREO DE AGUAS

INFORMACIÓN DEL MUESTREO LEVANTADA EN CAMPO

Identificación de la muestra				
Código de muestreo	**Identificación [A]**	**Coordenadas UTM**	**Tipo de matriz**	**Código de recepción de muestra**
AR-11	Relleno Sanitario	17 M 746964 / 9688010	Agua residual	A2025-359

Condiciones ambientales					
Tipo de toma de muestra	**No. de alícuota**	**Hora de toma**	**Temperatura (ºC)**	**Humedad (%)**	**Precipitación**
Simple	1	13:35	28,1	48,0	Ausencia

Identificación para descargas		
Tipo de tratamiento	**Periodicidad**	**Cuerpo receptor**
Físico	24 horas	Cuerpo hídrico de aguas dulce

RESULTADOS

Parámetro	Método de referencia	Unidades	Resultado	± U [B]
Potencial de hidrógeno (In situ)	APA-06 / Standard Methods 24: APHA-AWWA-WEF SM 4500-H+ B, edition 24th, 2023.	U de pH	**8,10**	± 0,18
Temperatura (In situ)	APA-08 / Standard Methods 24 APHAAWWA-WEF SM 2550 B, Edition 24th, 2023.	°C	**23,5**	± 0,168
Cloruros	APA-40 / Standard Methods 24 APHA-AWWA-WEF SM 4500 Cl- B, edition 24th, 2023.	mg/L	**21,19**	± 0,423
Fósforo	APA-27 / Standard Methods 24 APHA-AWWA-WEF SM 4500–P B y 4500-P C, Edition 24th, 2023.	mg/L	**6,38**	± 0,224
Sólidos suspendidos totales	APA-14 / Standard Methods 24 APHAAWWA-WEF SM, 2540 D, Edition 24th, 2023.	mg/L	**70,4**	± 2,00
Sulfatos	APA-24 / EPA 375.4 SO4-2, 1993	mg/L	**104,72**	± 3,100

INFORME DE RESULTADOS DEL MUESTREO DE AGUAS

Parámetro	Método de referencia	Unidades	Resultado	± U [B]
Grasas y aceites [E]	PRA-30 / Standard Methods 5520 B Ed.24,2023	mg/L	**< 20,0**	No estimable
Coliformes Fecales [E]	PRM-02 / Standard Methods 9221 E Ed.24, 2023	NMP/100 mL	**130,0**	± 0,44
Demanda Bioquímica de Oxigeno 5 [E]	PRA-23 / Standard Methods 5210B Ed.24, 2023	mg/L	**146,22**	± 2,85
Demanda Química de Oxígeno (DQO) [E]	PRA-09 / Standard Methods 5220 D F Ed. 24,2023	mg/L	**392,02**	± 25,46
Tensoactivos [E]	PRA-15 / Standard Methods 5540 C Ed. 24, 2023	mg/L	**< 0,10**	No estimable
Fenoles [E]	PRA-16 / HACH 8047, Ed. 08, 2014	mg/L	**< 0,001**	No estimable
Hierro [E]	PRA-54 / Standard Methods 3111 B Ed. 24, 2023 Standard Methods 3030 E Ed.24, 2023	mg/L	**0,275**	± 0,023
Nitrógeno total Kjeldahl [E]	PRA-60 / Standard Methods 2023,4500-Norg y 4500 NH3.C, Ed. 24, 2023	mg/L	**< 25,0**	No estimable

CONFORMIDAD

Parámetro	Unidades	Resultado	Incertidumbre [B]	limite permisible [C]	Conformidad [D]
Potencial de hidrógeno (In situ)	U de pH	**8,10**	± 0,18	6 a 9	**Cumple**
Temperatura (In situ)	°C	**23,5**	± 0,168	Condición natural ± 3	**Cumple**
Cloruros	mg/L	**21,19**	± 0,423	1.000	**Cumple**
Fósforo	mg/L	**6,38**	± 0,224	10,0	**Cumple**
Sólidos suspendidos totales	mg/L	**70,4**	± 2,00	130	**Cumple**

INFORME DE RESULTADOS DEL MUESTREO DE AGUAS

Parámetro	Unidades	Resultado	Incertidumbre [B]	limite permisible [C]	Conformidad [D]
Sulfatos	mg/L	**104,72**	± 3,100	1.000	**Cumple**
Grasas y aceites [E]	mg/L	**< 20,0**	No estimable	30,0	**Cumple**
Coliformes Fecales [E]	NMP/100 mL	**130,0**	± 0,44	2.000	**Cumple**
Demanda Bioquímica de Oxigeno 5 [E]	mg/L	**146,22**	± 2,85	100	**No cumple**
Demanda Química de Oxígeno (DQO) [E]	mg/L	**392,02**	± 25,46	200	**No cumple**
Tensoactivos [E]	mg/L	**< 0,10**	No estimable	0,5	**Cumple**
Fenoles [E]	mg/L	**< 0,001**	No estimable	0,2	**Cumple**
Hierro [E]	mg/L	**0,275**	± 0,023	10,0	**Cumple**
Nitrógeno total Kjeldahl [E]	mg/L	**< 25,0**	No estimable	50,0	**Cumple**

OBSERVACIONES Y DESVÍOS

Observaciones:

- El muestreo se realizó de acuerdo a las características descritas en los TDR´s y orden de compra.
- El sitio de muestreo fue definido por el cliente y estuvo presente personal encargado.

Desvíos: No se identificó ninguna deviación durante la ejecución del proyecto.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLES DE INFORME

Firmado electrónicamente por:
JUAN FELIPE MEDINA CEVALLOS
Validar únicamente con FirmaEC

Ing. Juan Medina
Gerente General
ACLAB Asesoría, Consultoría y Laboratorio Ambiental S.A.S. B.I.C.

Firmado electrónicamente por:
FAUSTO ADRIAN PACHACAMA SOLA
Validar únicamente con FirmaEC

Lcdo. Adrián Pachacama S.
Responsable de laboratorio
ACLAB Asesoría, Consultoría y Laboratorio Ambiental S.A.S. B.I.C.

Notas:

[A] Información proporcionada por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza de dicha información.
[B] Incertidumbre expandida, "La incertidumbre reportada se basa en la incertidumbre expandida multiplicada por un factor de cobertura k=2, que garantiza un nivel de confianza aproximada del 95%".
[C] LMP: Límite máximo permisible tomado de Tabla 9 de Anexo 1 del TULSMA AM 097 A
[D] Conformidad: El criterio de conformidad se basa en la regla de decisión conforma a lo estipulado en la norma ILAC-G8:09/2019, para conocer el diagrama utilizado hacer click **aquí**
[E] Parámetro subcontratado con el laboratorio acreditado SAE LEN 05-005, informe de resultados: PROTOCOLO: 743170 / 2025 - 1.0

Prohibida la reproducción parcial por cualquier medio sin permiso por escrito del laboratorio.
ACLAB se responsabiliza exclusivamente de los resultados obtenidos durante las condiciones del monitoreo realizado y reportados en el presente informe.
El laboratorio se compromete con la Imparcialidad y Confidencialidad de la información y los resultados.
La información completa relativa al ensayo está a disposición del cliente (hojas de campo, datos, cálculos, etc..).

ACLAB

LABORATORIO AMBIENTAL

ANEXO 1

Croquis de muestreo

Organización:	Laboratorio:
Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Del Cantón Paute	ACLAB Asesoría, Consultoría y Laboratorio Ambiental S.A.S
Paute	ACLAB
Nomenclatura	**Fecha de muestreo**
Sitio de monitoreo	1 de diciembre de 2025
Ubicación	
Código	**Coordenadas**
AR-11	17 M 746964 / 9688010
Ubicación en el Ecuador	
	Azuay-Ecuador
Responsable	**Orientación**
Wazhingthon Delgado	N



ACLAB
LABORATORIO AMBIENTAL

ANEXO 2

CERTIFICADO DE ACREDITACIÓN

SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO

QUITO - ECUADOR

ACLAB

ACREDITACIÓN INICIAL: 2023-08-04

Se encuentra acreditado por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano, SAE, en cumplimiento con los requisitos establecidos en la:
Accredited by the Servicio de Acreditación Ecuatoriano, SAE, in compliance with the requirements established in the:

Norma NTE – INEN ISO/IEC 17025:2018. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, equivalente a la Norma ISO/IEC 17025:2017.
NTE – INEN ISO/IEC 17025:2018. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, equivalent to ISO/IEC 17025:2017.

La presente acreditación demuestra competencia técnica para el alcance de acreditación en la realización de las **actividades de Ensayos**, disponible en web del SAE, está condicionada al cumplimiento continuo por parte del OEC con los requisitos de acreditación, sujeta a modificaciones, suspensiones, y retiros.
This accreditation demonstrates technical competence for the scope of accreditation to performing Testing activities, available on the SAE website. This accreditation is conditioned to the continuous compliance by the OEC with the accreditation requirements, it is subject to modifications, suspensions, and withdrawals.

www.acreditacion.gob.ec

El presente certificado solo tiene validez con su correspondiente alcance de acreditación.
This certificate is only valid with its corresponding accreditations scope.

Dr. Carlos Echeverría Cueva
DIRECTOR EJECUTIVO
SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO

IAAC INTER-AMERICAN ACCREDITATION COOPERATION
APAC ASIA PACIFIC ACCREDITATION COOPERATION
ilac-MRA
SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO

SAE firmante de Acuerdos de Reconocimiento Multilateral

Código de certificado emitido: 23-0177-LEN-2023-08-04

ACLAB
LABORATORIO AMBIENTAL

ANEXO 3

¡REGISTRO FOTOGRÁFICO





Fotografías 1 y 2: Muestreo de agua residual, AR-11: Relleno Sanitario.

.

.

.

ANEXO 3. DISEÑO DE CELDA

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE CRECIMIENTO

No.	AÑO	Total	Total
	2020	**29,214**	
0	2021	**29,433**	0.7%
1	2022	**29,645**	0.7%
2	2023	**29,847**	0.7%
3	2024	**30,040**	0.6%
4	2025	**30,223**	0.6%
0	2026	**30,398**	0.6%
1	2027	**30,563**	0.5%
2	2028	**30,563**	0.0%
3	2029	**30,866**	1.0%
4	2030	**31,004**	0.4%
5	2031	**31,189**	0.6%
6	2032	**31,375**	0.6%
7	2033	**31,562**	0.6%
8	2034	**31,751**	0.6%
9	2035	**31,940**	0.6%
10	2036	**32,131**	0.6%
11	2037	**32,323**	0.6%

Tasa de crecimiento:
Total= 0.60%

PARÁMETROS DE DISEÑO

Período de diseño: 10 años

Año inicial: 2027
Año final 2037

Proyección de población:

Crecimiento aritmético o lineal.

$Nt = No + No \times r \times t$

$r = \frac{Nt/No - 1}{t}$

Nt: Población inicial
No: Población final
t: Tiempo en años
r: Índice de crecimiento

r= 4.20%

Población inicial: 30,398 habitantes año 2026

Población servida con cobertura de la recolección:

Sin proyecto=	64%	
Inicial=	65.0%	
Incremento anual=	0.0%	
Final=	65.0%	

Generación percápita de residuos:

GPC=	0.51	kg/hab/día	DATOS GAD DE PAUTE
Incremento anual=	0.00%	De la generación percápita inicial	CONSTANTE NO HAY CRECIMIENTO ANUAL

Densidad de la basura estabilizada:

800 kg/m3 COMPACTADOS

Material de cobertura:

20% Volumen de basura

Residuos semanales al relleno	73.5	ton/sem	DATOS GAD DE PAUTE
	10.5	ton/dia	
residuos urbanos	64.6	%	DATOS GAD DE PAUTE
residuos rurales	35.4	%	GAD

COMPOSICIÓN ESPECÍFICA DE LOS RS NO PELIGROSOS

Composición general	Composición típica	Composición específica	Peso (kg)	Peso (%)	Aprovechamiento
Orgánica	Materia Organica	Alimentos y huesos	993.32	62.6%	Abono
	Papel y cartón	Tetra Pack	2.29	0.1%	Reutilizable
		Cartón	116.78	7.4%	Reutilizable
	Plásticos	Suave	114.97	7.2%	Reciclable
		Rigido	97.55	6.1%	Reciclable
	Ropas y telas	Productos textiles	34.86	2.2%	Reutilizable
	Madera	Madera	6	0.4%	Reutilizable
Inorgánica	Metales	General	48.41	3.1%	Reciclable
	Vidrio	General	59.56	3.8%	Reciclable
	Material de desecho	Tierra, sólido de desbaste, papel de baño, polvo y servilletas	113.47	7.1%	Desecho
		TOTAL	1,587.21		

POTENCIAL DE APROVECHAMIENTO		
Orgánico	***Reciclable***	***No reciclable***
62.6%		
	0.1%	
	7.4%	
	7.2%	
	6.1%	
	2.2%	
	0.4%	
	3.1%	
	3.8%	
		7.1%
62.6%	30.3%	7.1%

Compostaje 50%

Reutilización 75%

COMPONENTES	PROMEDIO	
	PESO (Kg)	%
Materia Orgánica	54,50	62,0
Métales	1,71	2,0
Vidrio	4,71	5,4
Plástico suave	4,29	4,9
Plástico rigido	4,57	5,2
Tetra Pack	2,29	2,6
Madera	0,00	0,0
Cartón	2,36	2,7
Textil	1,86	2,1
Papel Higiénico	11,29	12,8
Otros	0,29	0,3
TOTAL	87,87	100,00

COMPONENTES	PROMEDIO	
	PESO (kg)	%
MATERIA ORGÁNICA	148.00	29.1%
METALES	34.50	6.8%
VIDRIO	38.00	7.5%
PLÁSTICO SUAVE	37.50	7.4%
PLÁSTICO RÍGIDO	51.50	10.1%
MADERA	6.00	1.2%
CARTÓN	71.00	14.0%
TEXTIL	33.00	6.5%
PAPEL HIGIÉNICO	66.00	13.0%
OTROS	23.00	4.5%
TOTAL	**508.50**	**100.0%**

3.4.4.1.1. Mercado "San José"

COMPONENTE	GENERACIÓN DIARIA (kg * día^{-1})	% PESO	PESO ESPECÍFICO (kg * m^{-3})
MATERIA ORGÁNICA	60.96	88.81%	
METALES	1.69	2.47%	
VIDRIO	0.34	0.49%	
PLÁSTICO SUAVE	4.33	6.30%	
PLÁSTICO RÍGIDO	0.79	1.16%	
TETRA PACK			159.42
MADERA			
PAPEL Y CARTÓN			
TEXTIL			
PAPEL HIGIÉNICO	0.53	0.77%	
MATERIAL INERTE			
TOTAL	**68.64**	**100.00%**	

3.4.4.1.2. Mercado "26 de Febrero"

COMPONENTE	GENERACIÓN DIARIA (kg * día^{-1})	% PESO	PESO ESPECÍFICO (kg * m^{-3})
MATERIA ORGÁNICA	729.86	79.14%	
METALES	10.51	1.14%	
VIDRIO	16.51	1.79%	
PLÁSTICO SUAVE	68.85	7.47%	
PLÁSTICO RÍGIDO	40.69	4.41%	
TETRA PACK			151.78
MADERA			
PAPEL Y CARTÓN	43.42	4.71%	
TEXTIL			
PAPEL HIGIÉNICO	12.36	1.34%	
MATERIAL INERTE			
TOTAL	**922.21**	**100.00%**	

No.	AÑO	POBLACIÓN	COBERTURA	POBLACIÓN SERVIDA	GPC	PRODUCCIÓN	AL RELLENO	RECOLECCIÓN	AL RELLENO	VOLUMEN RELLENO SANITARIO			VRS TOTAL ANUAL		
									No reciclable	*Basura*	*Material cobertura*	*Total*	*Parcial*	*Aprovechamiento por acentamiento*	*Acumulado*
		(habitantes)			(kg/hab/día)	(kg/día)	%	(kg/día)	(kg/día)	(m3/día)	(m3/día)	(m3/día)	(m3/año)	(m3/año)	(m3/año)
														15%	
0	2026	30,398	65.0%	19,759	0.510	10,070	100.0%	10,070	10,070	12.6	3.8	16.4	5,973	5,077	5,077
1	2027	30,563	65.0%	19,866	0.510	10,125	100.0%	10,125	10,125	12.7	3.8	16.5	6,005	5,104	5,104
2	2028	30,563	65.0%	19,866	0.510	10,125	100.0%	10,125	10,125	12.7	3.8	16.5	6,005	5,104	10,209
3	2029	30,866	65.0%	20,063	0.510	10,225	100.0%	10,225	10,225	12.8	3.8	16.6	6,065	5,155	15,364
4	2030	31,004	65.0%	20,153	0.510	10,271	100.0%	10,271	10,271	12.8	3.9	16.7	6,092	5,178	20,542
5	2031	31,189	65.0%	20,273	0.510	10,332	100.0%	10,332	10,332	12.9	3.9	16.8	6,128	5,209	25,751
6	2032	31,375	65.0%	20,394	0.510	10,394	100.0%	10,394	10,394	13.0	3.9	16.9	6,165	5,240	30,991
7	2033	31,562	65.0%	20,516	0.510	10,456	100.0%	10,456	10,456	13.1	3.9	17.0	6,202	5,271	36,262
8	2034	31,751	65.0%	20,638	0.510	10,518	100.0%	10,518	10,518	13.1	3.9	17.1	6,239	5,303	41,565
9	2035	31,940	65.0%	20,761	0.510	10,581	100.0%	10,581	10,581	13.2	4.0	17.2	6,276	5,334	46,899
10	2036	32,131	65.0%	20,885	0.510	10,644	100.0%	10,644	10,644	13.3	4.0	17.3	6,313	5,366	52,266
11	2037	32,323	65.0%	21,010	0.510	10,708	100.0%	10,708	10,708	13.4	4.0	17.4	6,351	5,398	57,664

ÁREAS CADA 15 m

TERRAZA 3	
ÁREA	VOLÚMEN
118.618 m2	1769.685 m3
117.34 m2	1793.7 m3
121.82 m2	1832.4 m3
122.5 m2	1846.5 m3
123.7 m2	1753.65 m3
110.12 m2	
SUMA	8995.935 m3

TERRAZA 2	
ÁREA	VOLÚMEN
169.545 m2	2642.775 m3
182.825 m2	2831.565 m3
194.717 m2	3055.98 m3
212.747 m2	3345.6525 m3
233.34 m2	3469.7775 m3
229.297 m2	
SUMA	15345.75 m3

TERRAZA 1	
ÁREA	VOLÚMEN
151.107 m2	2309.3925 m3
156.812 m2	2585.3175 m3
187.897 m2	3568.935 m3
287.961 m2	4055.5575 m3
252.78 m2	4004.985 m3
281.218 m2	
SUMA	16524.1875 m3

SUMA TOTAL	40865.8725 m3

ÁREAS CADA 10 M

BANCO DE MATERIAL DE COBERTURA A	
107.64 m2	999.015 m3
92.163 m2	852.45 m3
78.327 m2	715.245 m3
64.722 m2	639.775 m3
63.233 m2	754.06 m3
87.579 m2	
SUMA	3960.545 m3

BANCO DE MATERIAL DE COBERTURA B	
107.736 m2	1447.35 m3
181.734 m2	1877.365 m3
193.739 m2	2114.36 m3
229.133 m2	2733.87 m3
317.641 m2	
SUMA	8172.945 m3

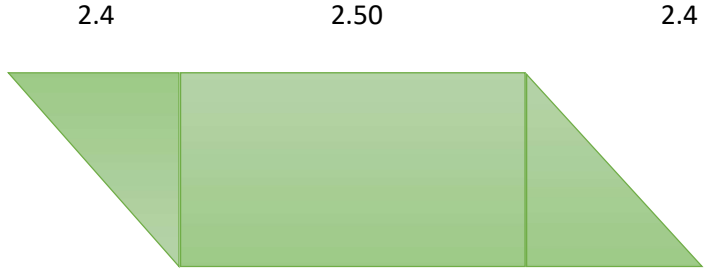
SUMA TOTAL	12133.49 m3

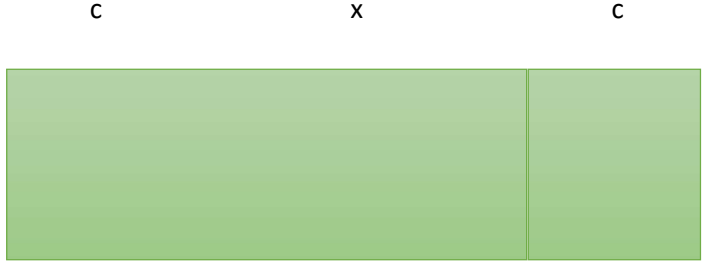
DATOS		
Peso diario:	10707.5398	kg
Nro dias:	2	u
Peso diseño:	21415.0795	kg
Densidad de la basura estabilizada:	800	kg/m3
Volumen residuos estabilizados:	26.769	m3
Porcentaje material de cobertura	30%	
Volumen de material de cobertura	8.03	

Volumen celda	34.800

Dimenciones de celda		
b	6	m
h	1.2	m
c	2.4	m
x	2.43	m
x (asumido)	2.50	m

VISTA PERFIL CELDA





VISTA PLANTA CELDA

ANEXO 4. PLANOS DE DISEÑO

IMPLANTACIÓN GENERAL

746 700 | 746 800 | 746 900 | 747 000 | 747 100

9 688 200 N

9 688 100 N

9 688 000 N

9 687 900 N

BANCO MATERIAL DE COBERTURA "B"

PATIO MANIOBRAS Y ACOPIO DE MATERIALES TERRAZA 2 Y 3

ZONA RECICLAJE NUEVA

ZONA DE PESAJE

TERRAZA 3

TERRAZA 2

TERRAZA 1

CUNETA PERIMETRAL

PATIO MANIOBRAS Y ACOPIO DE MATERIALES TERRAZA 1

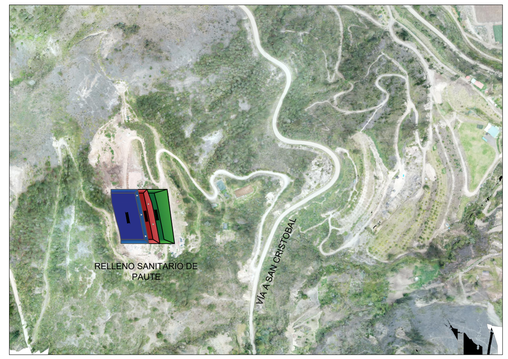
CUNETA PERIMETRAL

ZONA RECICLAJE EXISTENTE

BANCO MATERIAL DE COBERTURA "A"

ZONA DE TRAMIENTO DE LIXIVIADOS HUMEDALES ARTIFICIALES (EXISTENTE)

UBICACIÓN



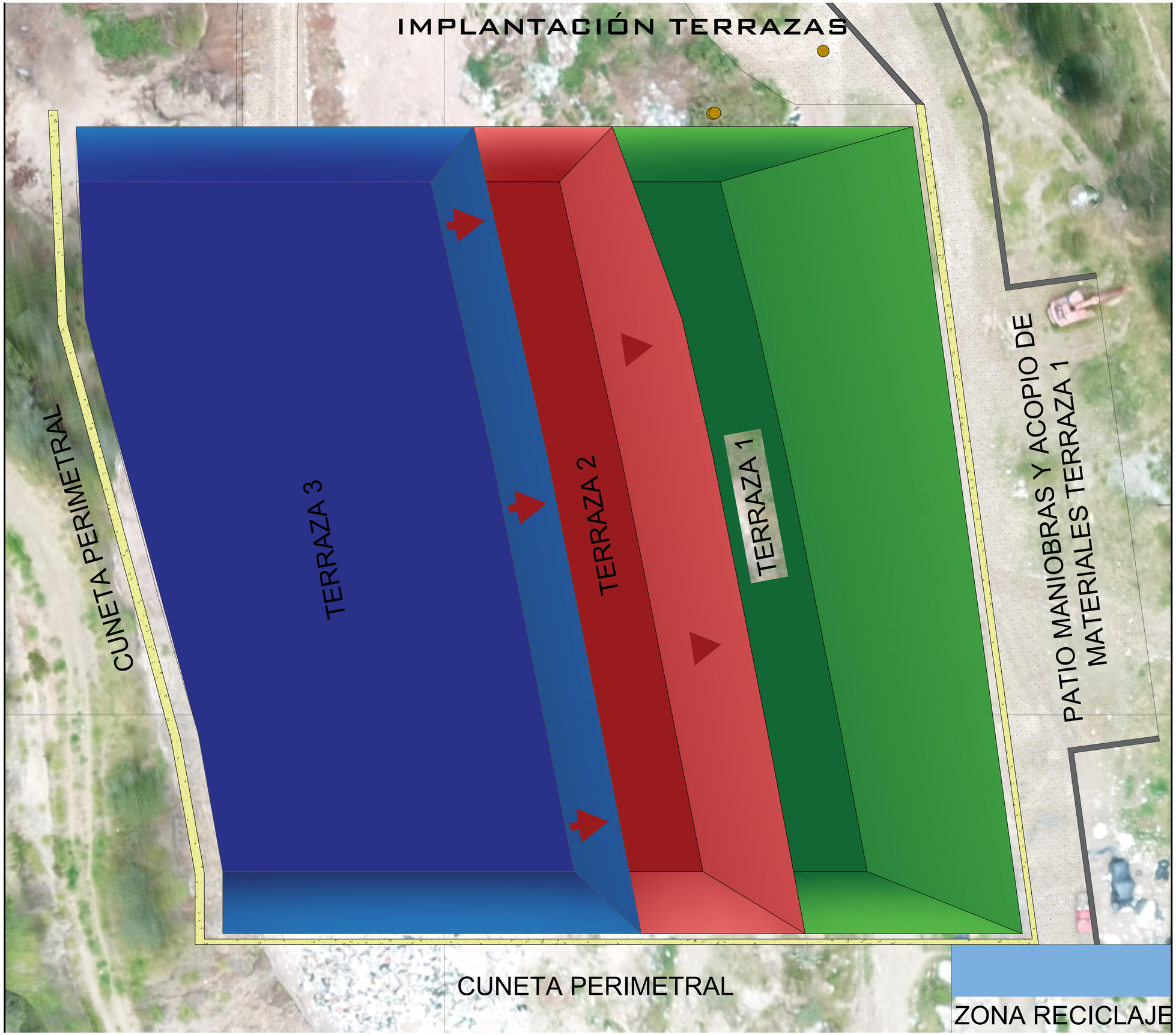
SIMBOLOGÍA

	VÍA DE ACCESO
	CAMINERAS

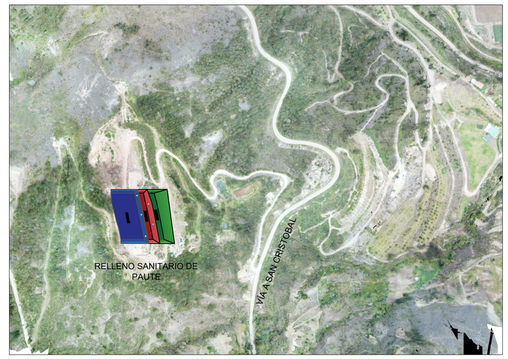
UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:750	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: IMPLANTACIÓN GENERAL	FECHA: ABRIL DE 2026

IMPLANTACIÓN TERRAZAS



UBICACIÓN



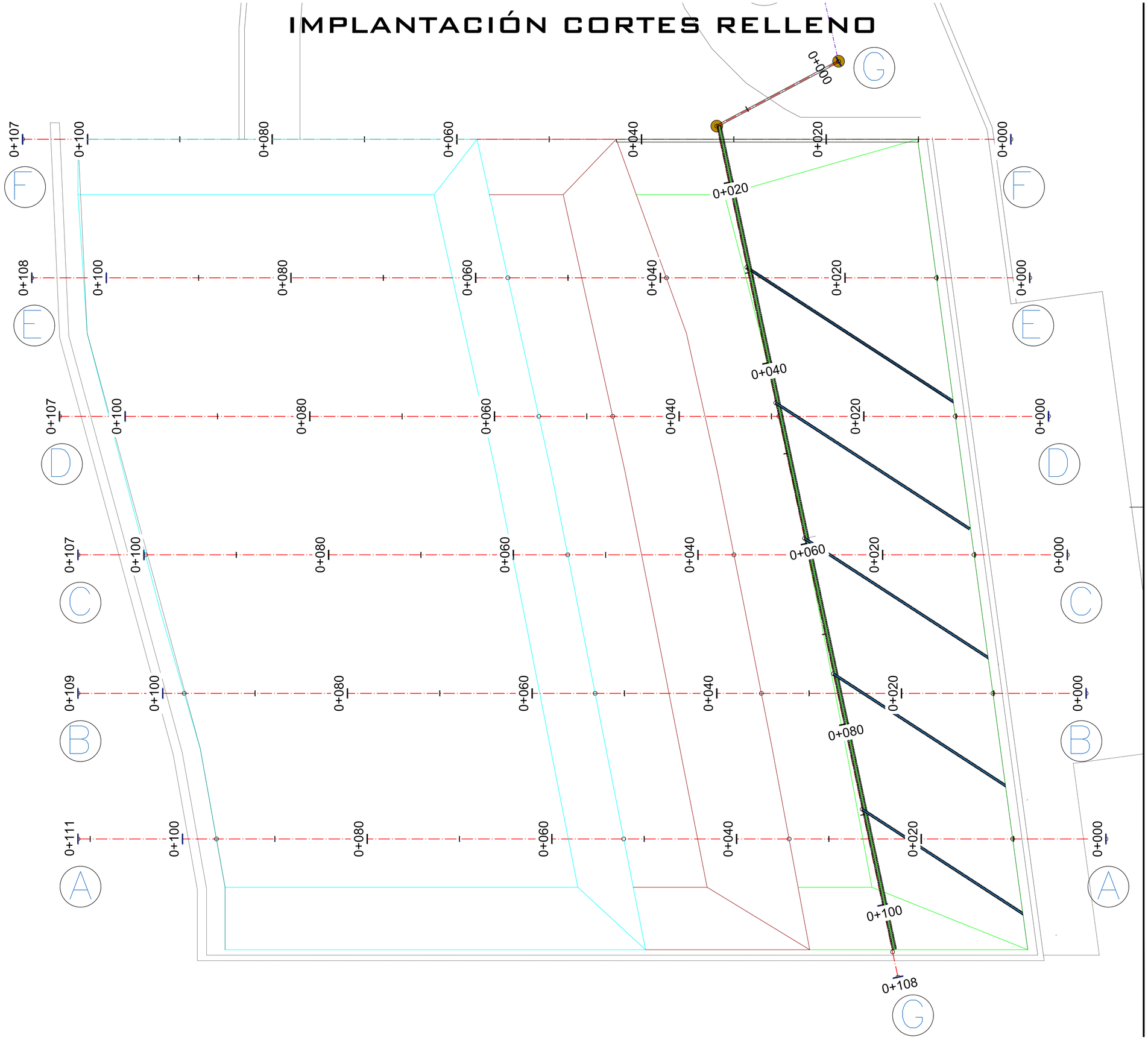
SIMBOLOGÍA

	TERRAZA 1
	TERRAZA 2
	TERRAZA 3

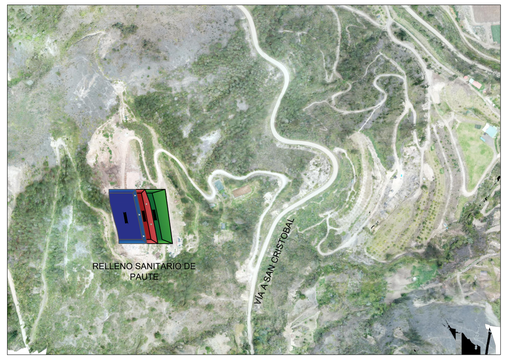
UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:200	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: IMPLANTACIÓN TERRAZAS	FECHA: ABRIL DE 2026

IMPLANTACIÓN CORTES RELLENO



UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

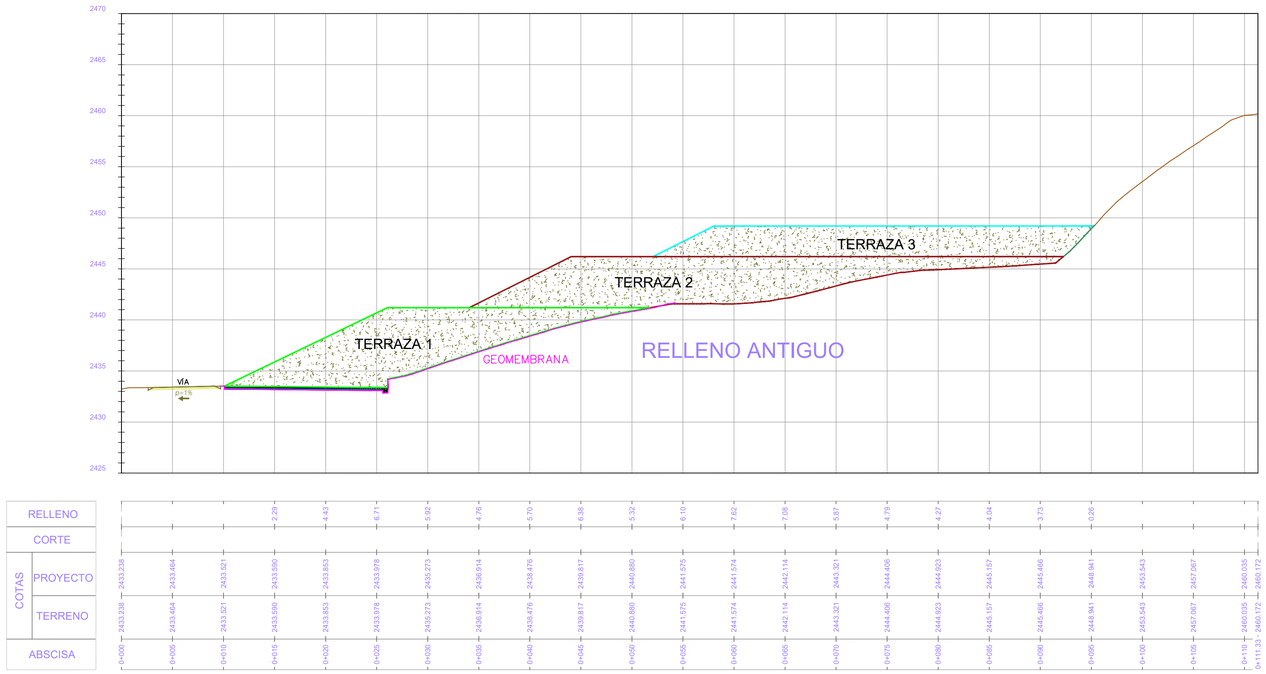
	TERRAZA 1
	TERRAZA 2
	TERRAZA 3

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

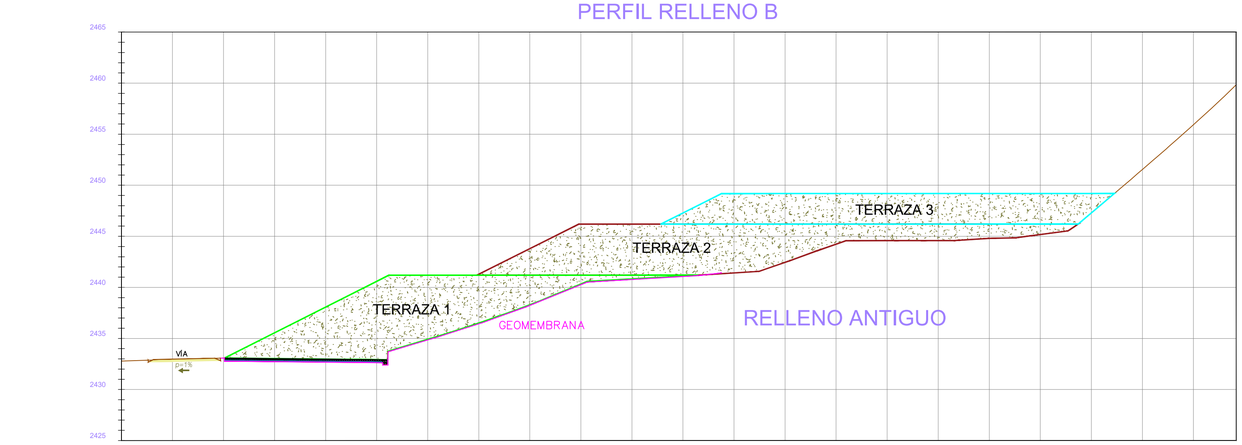
ESCALAS: 1:200	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: IMPLANTACIÓN CORTES TERRAZAS	FECHA: ABRIL DE 2026

PERFIL RELLENO A



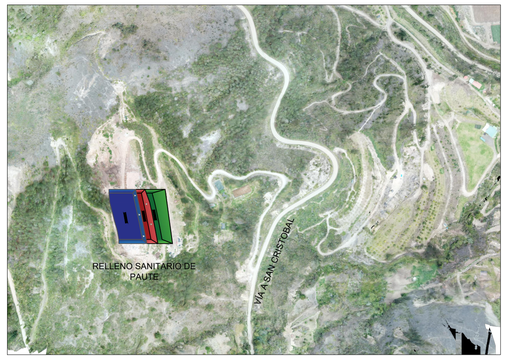
		0+000	0+005	0+010	0+015	0+020	0+025	0+030	0+035	0+040	0+045	0+050	0+055	0+060	0+065	0+070	0+075	0+080	0+085	0+090	0+095	0+100	0+105	0+110	0+111.33
RELLENO					2.29	4.43	6.71	5.92	4.78	5.70	6.38	5.32	6.10	7.62	7.08	5.87	4.79	4.27	4.04	3.73	0.26				
CORTE																									
COTAS	PROYECTO	2433.238	2433.464	2433.521	2433.590	2433.853	2433.978	2435.273	2436.914	2438.476	2439.817	2440.880	2441.575	2441.574	2442.114	2443.321	2444.406	2444.923	2445.157	2445.466	2446.941	2453.643	2457.097	2460.035	2460.172
	TERRENO	2433.238	2433.464	2433.521	2433.590	2433.853	2433.978	2435.273	2436.914	2438.476	2439.817	2440.880	2441.575	2441.574	2442.114	2443.321	2444.406	2444.923	2445.157	2445.466	2446.941	2453.643	2457.097	2460.035	2460.172
ABSCISA																									

PERFIL RELLENO B



		0+000	0+005	0+010	0+015	0+020	0+025	0+030	0+035	0+040	0+045	0+050	0+055	0+060	0+065	0+070	0+075	0+080	0+085	0+090	0+095	0+100	0+105	0+109.18
RELLENO					2.40	4.73	7.07	6.28	4.79	5.49	5.86	5.39	6.18	7.79	6.75	4.96	4.02	4.61	4.39	4.01	1.92		
CORTE																								
COTAS	PROYECTO	2432.780	2432.939	2433.077	2433.155	2433.338	2433.523	2434.913	2436.922	2438.300	2440.340	2440.806	2441.111	2441.608	2442.445	2444.233	2444.577	2444.581	2444.806	2445.185	2447.274	2451.542	2455.931	2459.836
	TERRENO	2432.780	2432.939	2433.077	2433.155	2433.338	2433.523	2434.913	2436.922	2438.300	2440.340	2440.806	2441.111	2441.608	2442.445	2444.233	2444.577	2444.581	2444.806	2445.185	2447.274	2451.542	2455.931	2459.836
ABSCISA																								

UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

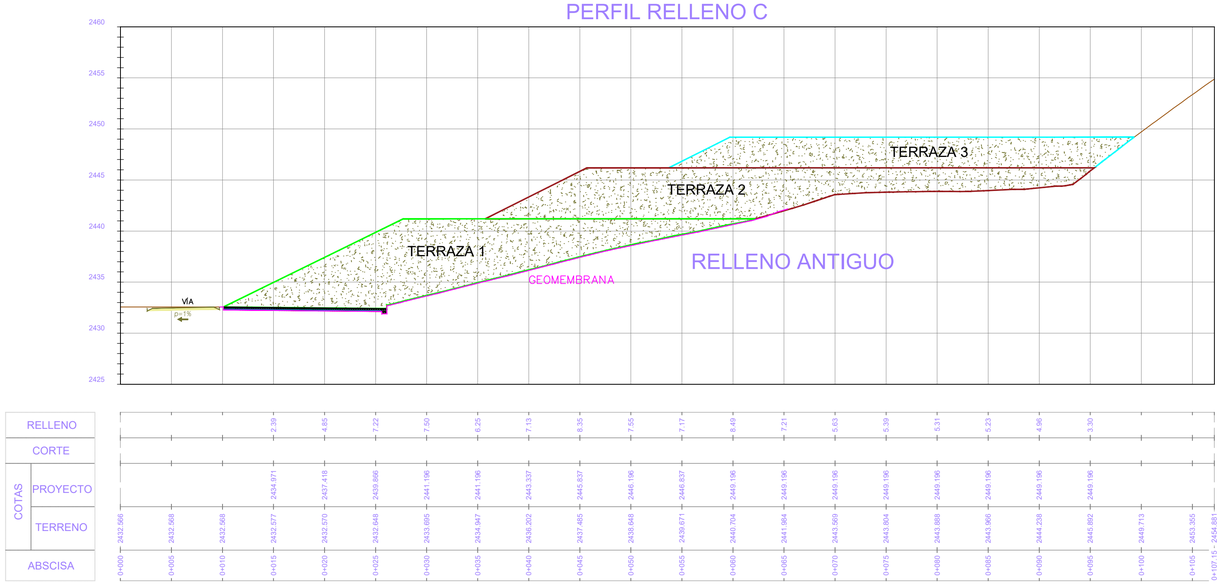
	TERRAZA 1
	TERRAZA 2
	TERRAZA 3
	RELLENO ANTIGUO
	GEOMEMBRANA

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

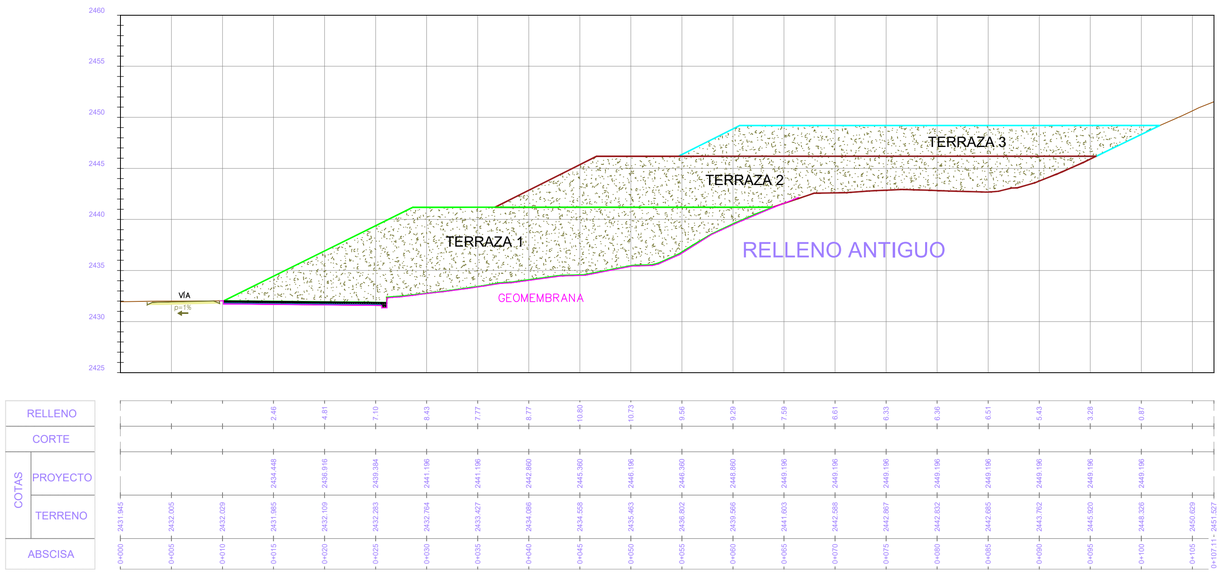
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL RELLENO A - B	FECHA: ABRIL DE 2026

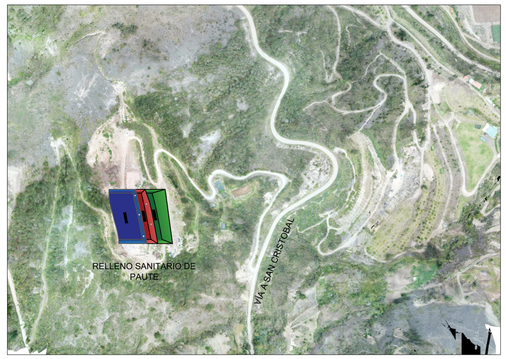
PERFIL RELLENO C



PERFIL RELLENO D



UBICACIÓN



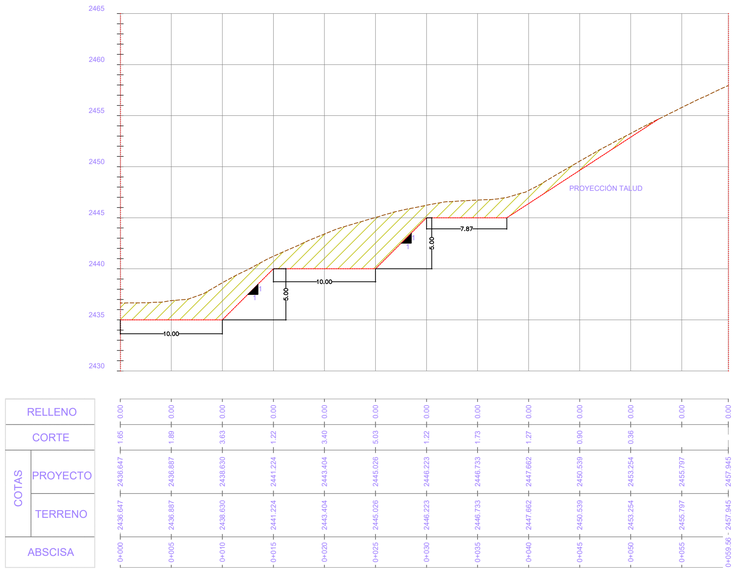
SIMBOLOGÍA

	TERRAZA 1
	TERRAZA 2
	TERRAZA 3
	RELLENO ANTIGUO
	GEOMEMBRANA

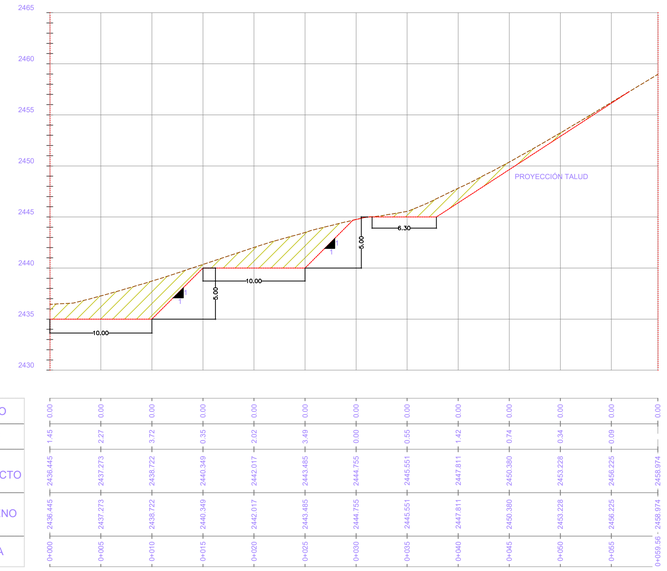
UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL RELLENO C - D	FECHA: ABRIL DE 2026

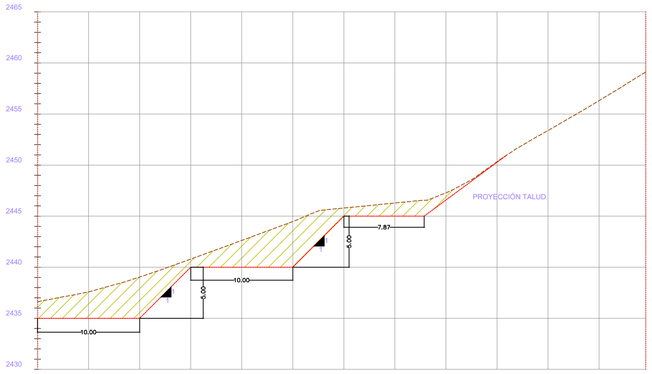
PERFIL MATERIAL DE COBERTURA A



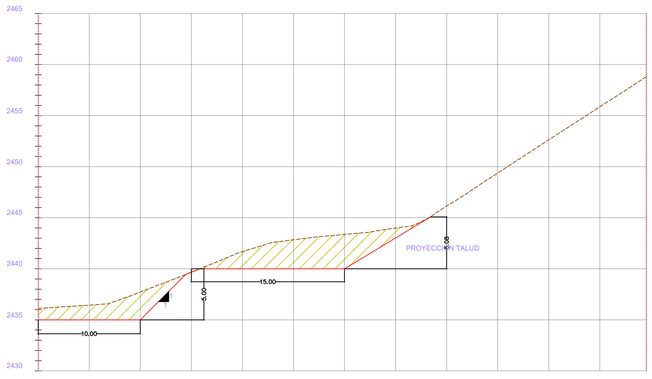
PERFIL MATERIAL DE COBERTURA C



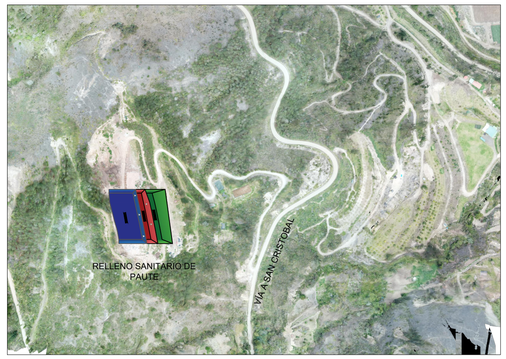
PERFIL MATERIAL DE COBERTURA B



PERFIL MATERIAL DE COBERTURA D



UBICACIÓN



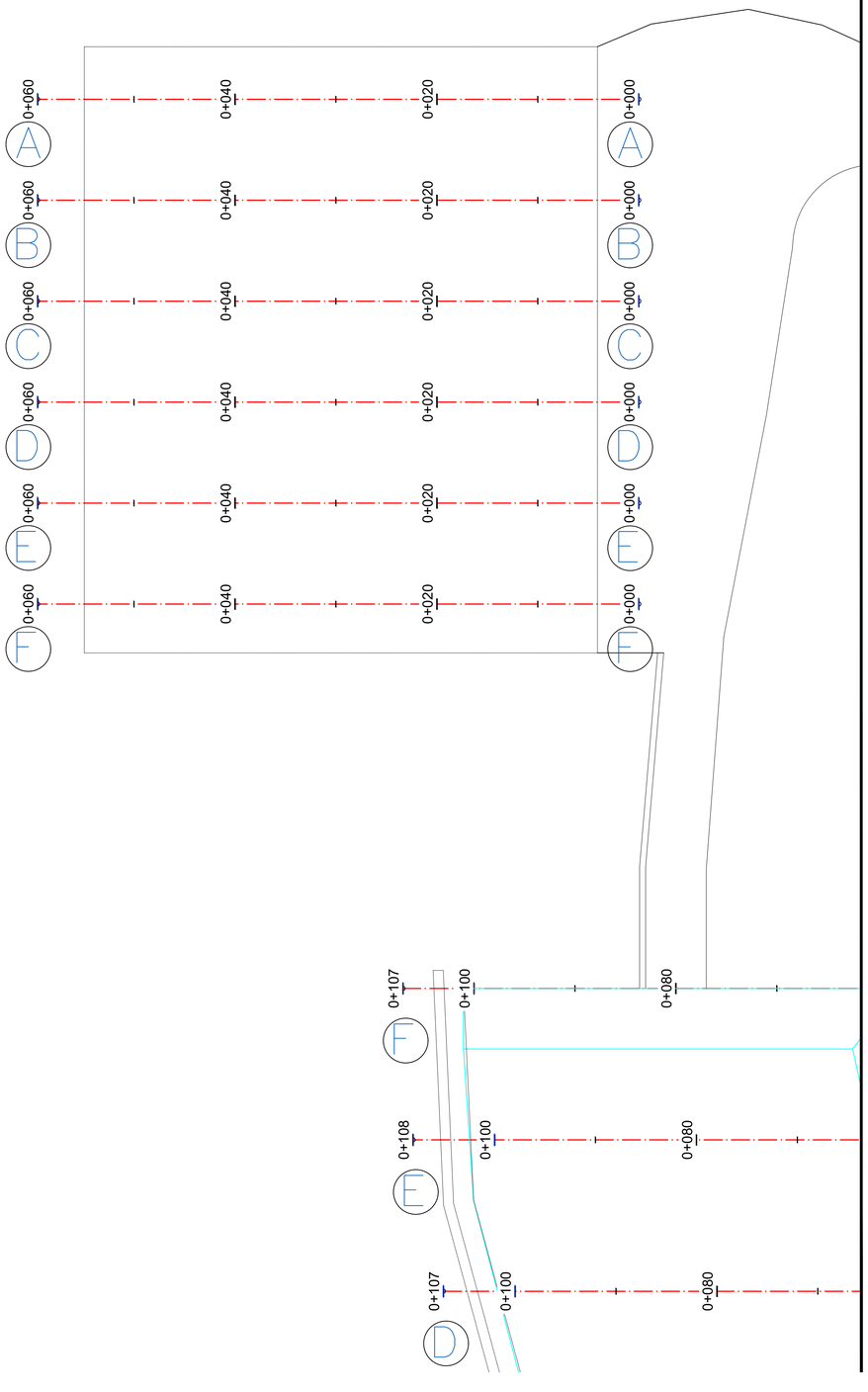
SIMBOLOGÍA

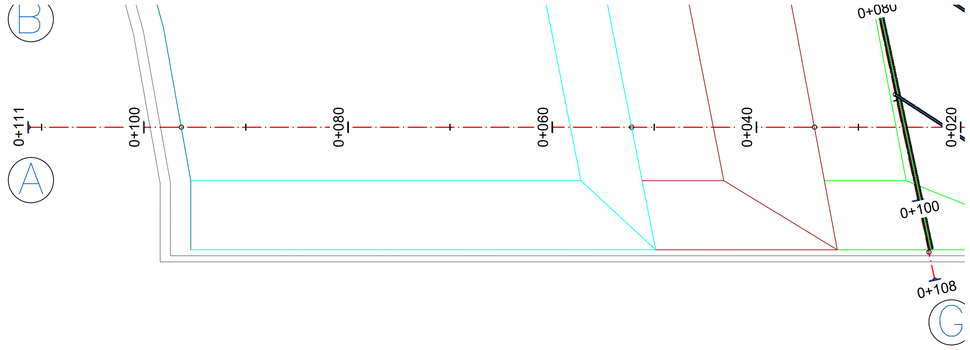
	TERRAZA 1
	TERRAZA 2
	TERRAZA 3
	RELLENO ANTIGUO
	GEOMEMBRANA

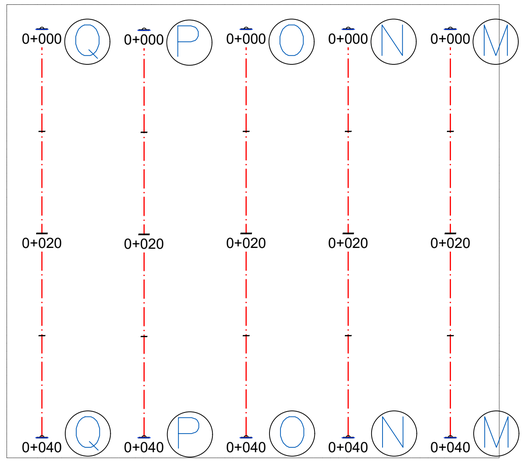
UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL RELLENO C - D	FECHA: ABRIL DE 2026

IMPLANTACIÓN CORTES BANCO DE MATERIAL DE COBERTURA "B"

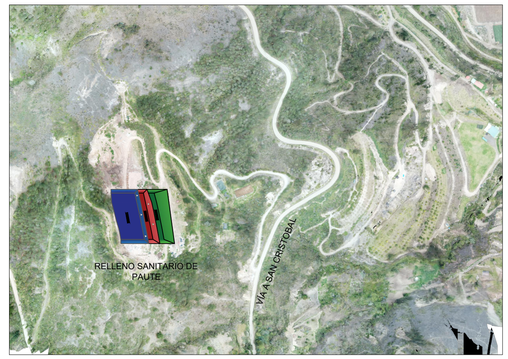






IMPLANTACIÓN CORTES BANCO DE MATERIAL DE COBERTURA "A"

UBICACIÓN

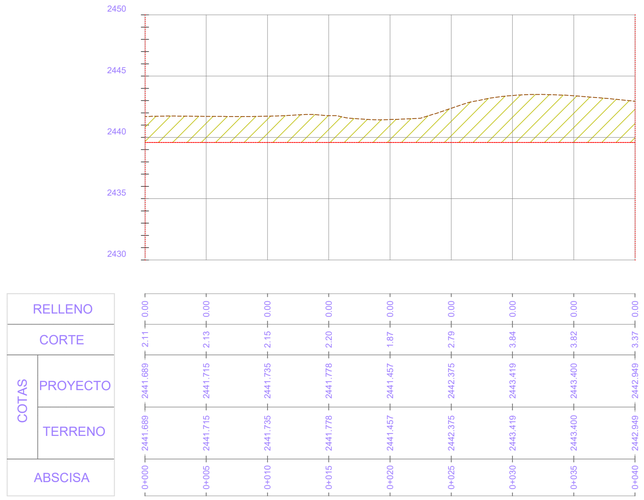


SIMBOLOGÍA

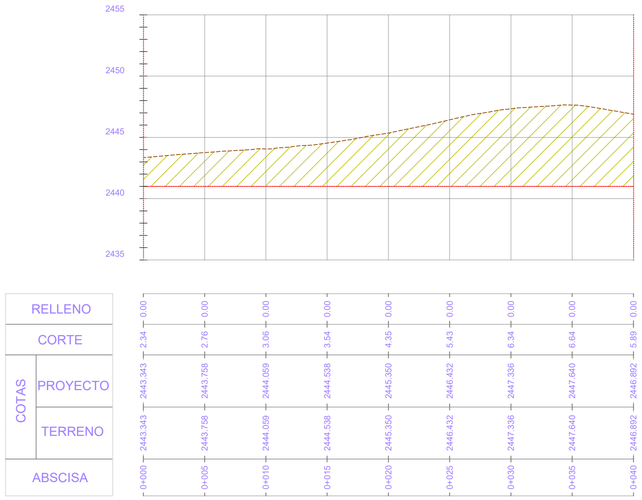
UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: IMPLANTACIÓN CORTES MATERIAL DE COBERTURA	FECHA: ABRIL DE 2026

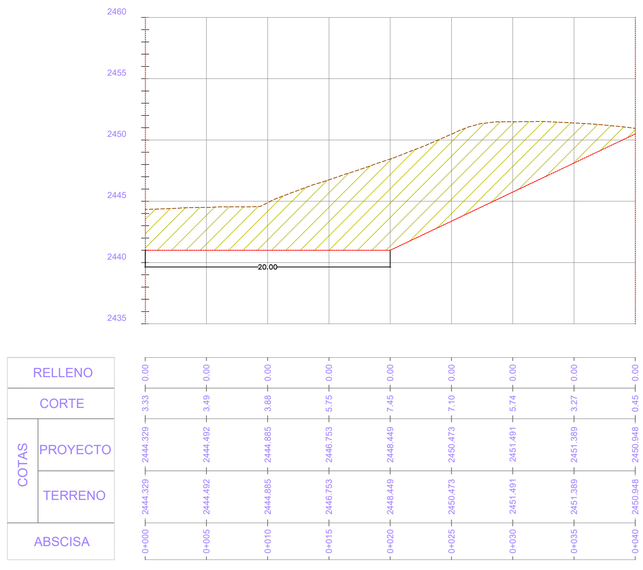
PERFIL MATERIAL DE COBERTURA M



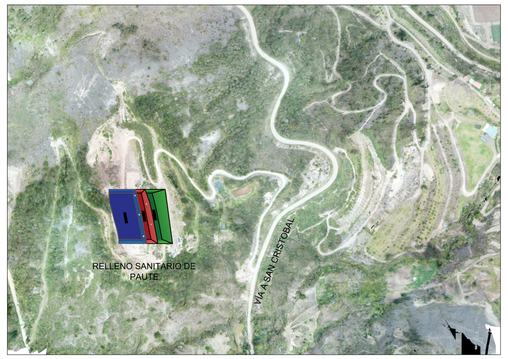
PERFIL MATERIAL DE COBERTURA N



PERFIL MATERIAL DE COBERTURA O



UBICACIÓN



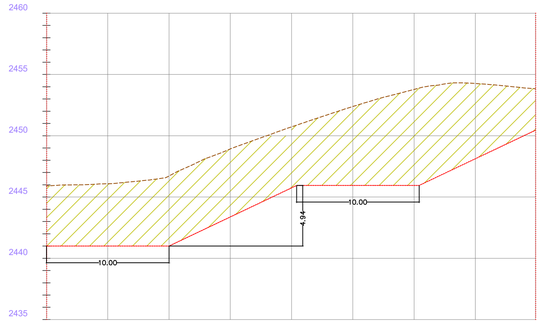
SIMBOLOGÍA

	MATERIAL DE COBERTURA EN BANCO
	RELLENO ACTUAL
	TALUD

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

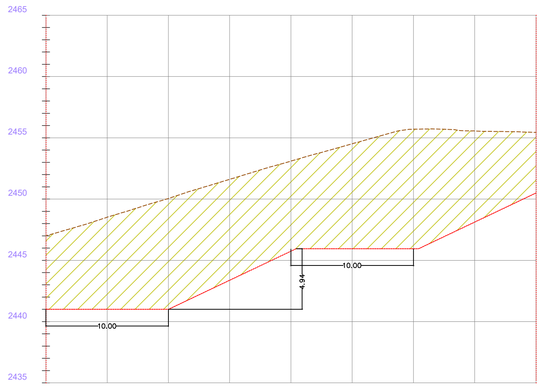
ESCALAS: 1:250	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL CORTES MATERIAL DE COBERTURA M, N, O	FECHA: ABRIL DE 2026

PERFIL MATERIAL DE COBERTURA P



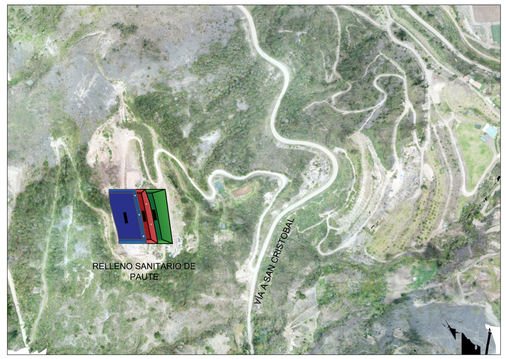
RELLENO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CORTE		4.91	5.08	5.71	5.55	4.68	6.44	7.84	6.14	3.39
COTAS	PROYECTO	2445.910	2446.084	2446.713	2448.923	2450.724	2452.387	2453.780	2454.263	2453.837
	TERRENO	2445.910	2446.084	2446.713	2448.923	2450.724	2452.387	2453.780	2454.263	2453.837
ABSCISA		0+000	0+005	0+010	0+015	0+020	0+025	0+030	0+035	0+039.91

PERFIL MATERIAL DE COBERTURA Q



RELLENO		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CORTE		6.00	7.52	9.05	8.24	7.35	8.57	9.76	7.44	4.94
COTAS	PROYECTO	2447.001	2448.516	2450.047	2451.809	2453.088	2454.512	2455.701	2455.559	2455.439
	TERRENO	2447.001	2448.516	2450.047	2451.809	2453.088	2454.512	2455.701	2455.559	2455.439
ABSCISA		0+000	0+005	0+010	0+015	0+020	0+025	0+030	0+035	0+040

UBICACIÓN



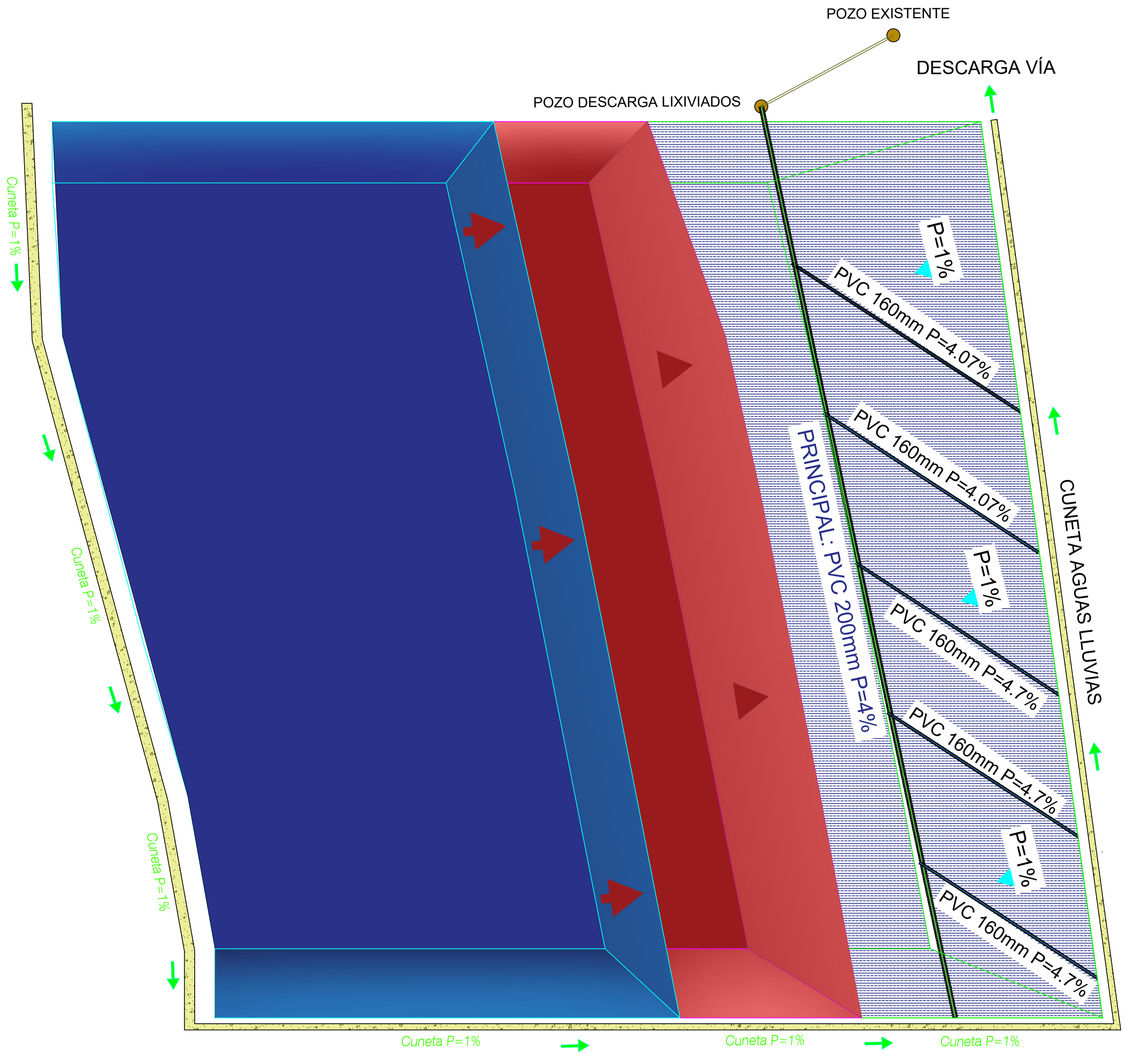
SIMBOLOGÍA

	MATERIAL DE COBERTURA EN BANCO
	RELLENO ACTUAL
	TALUD

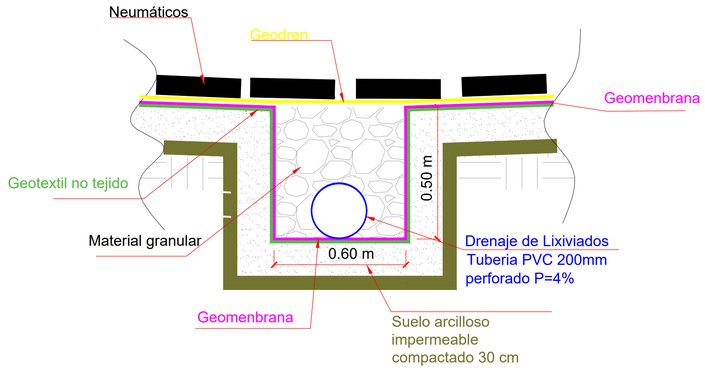
UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

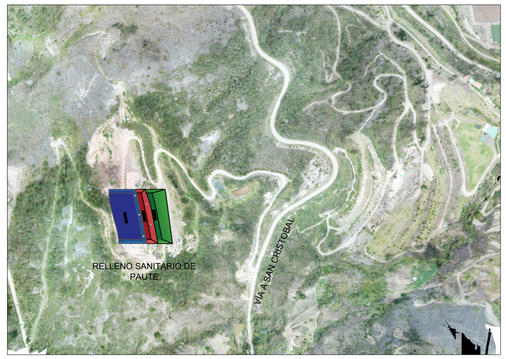
ESCALAS: 1:250	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL CORTES MATERIAL DE COBERTURA	FECHA: ABRIL DE 2026



DRENAJE DE LIXIVIADOS



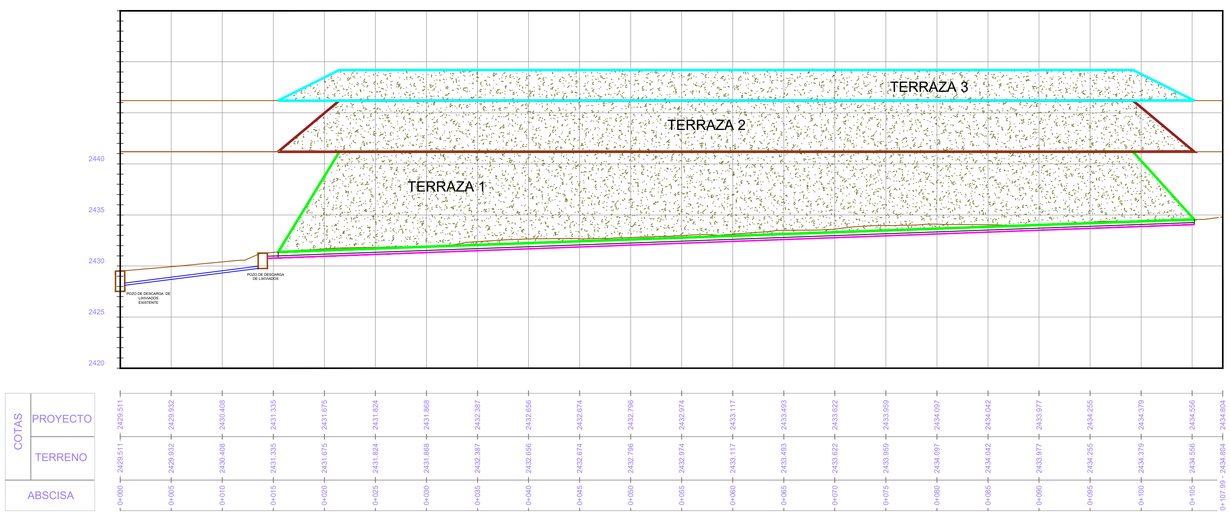
UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

	MATERIAL DE COBERTURA EN BANCO
	RELLENO ACTUAL
	TALUD

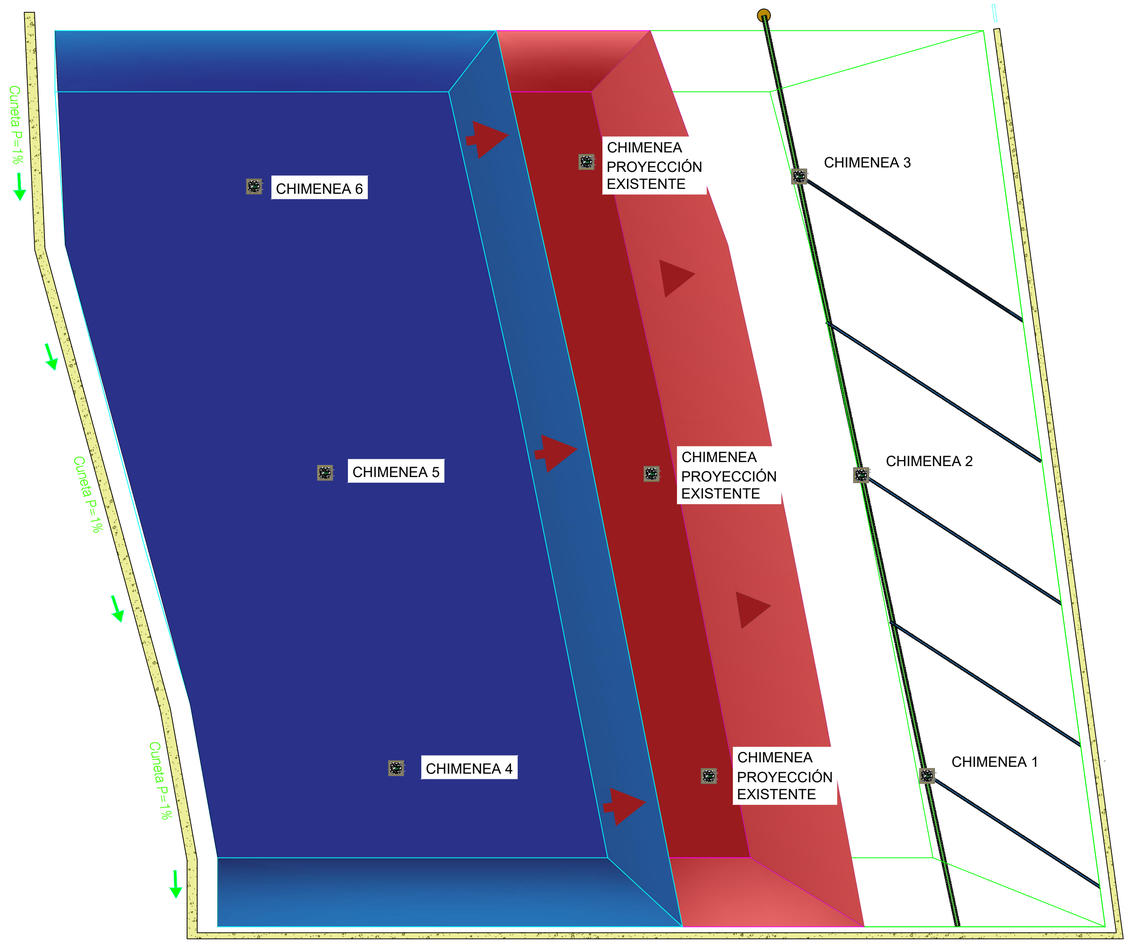
PERFIL RELLENO G

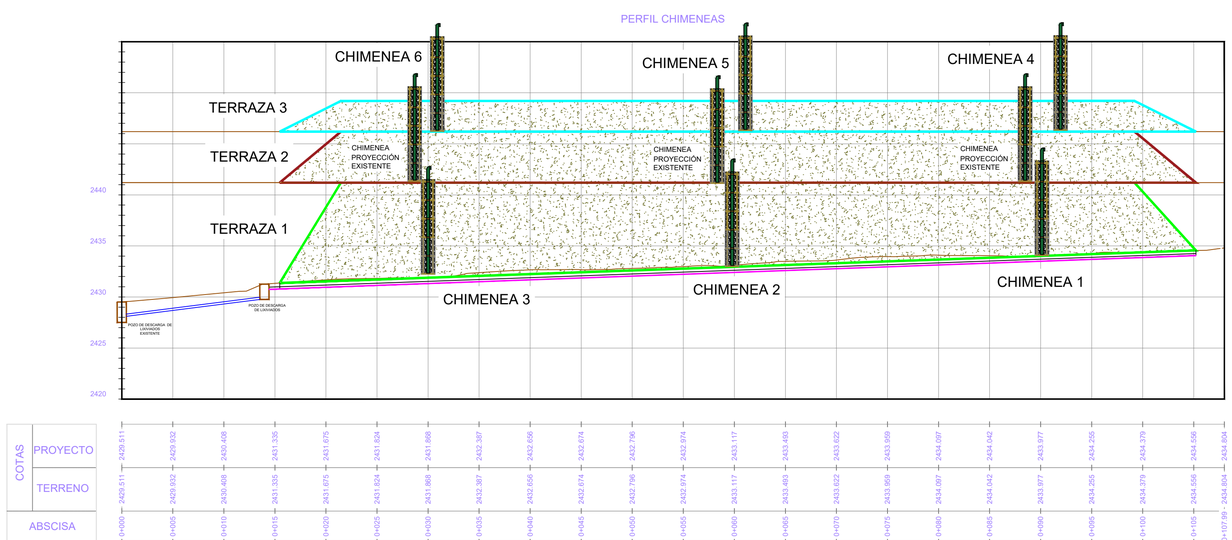


UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

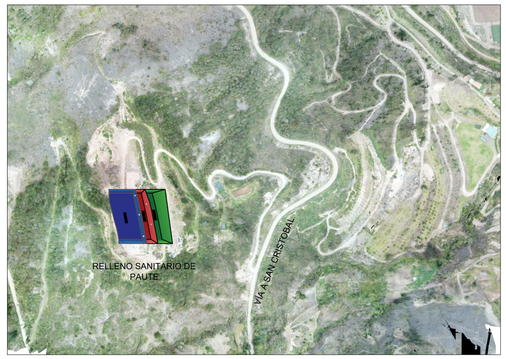
ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: PERFIL CORTES MATERIAL DE COBERTURA	FECHA: ABRIL DE 2026 1

UBICACIÓN CHIMENEAS





UBICACIÓN



SIMBOLOGÍA

	MATERIAL DE COBERTURA EN BANCO
	RELLENO ACTUAL
	TALUD

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

ESCALAS: 1:300	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
ANÁLISIS Y REINGENIERÍA DEL RELLENO SANITARIO DE PAUTE	ELABORACIÓN Y DISEÑO: ING. KAREN CONDO S. ING. PEDRO ZHINDÓN S
	REVISIÓN: ING. CÉSAR ARÉVALO V. DIRECTOR DE TESIS
CONTIENE: UBICACIÓN CHIMENEAS	FECHA: ABRIL DE 2026

ANEXO 5. CÁLCULOS HIDRAULICOS DRENAJE DE LIXIVIADOS

CAUDAL DE LIXIVIADO

Q= (P x A x k)/t

Q: Caudal medio de lixiviado (l/s)		
P: Precipitación media anual (mm/año)	1500	mm
A: Área superficial del relleno (m2)	7856.23	m2
t= Tiempo en segundos por año	31536000	s
K= Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura		
Debilmente compactados 0.4 a 0.7 t/m3	K= 0.25 a 0.50	
Fuertemente compactados >0.7 t/m3	k= 0.15 a 0.25	
Densidad inicial compactada : 0.4 a 0.5 t/m3		
Grado de compactación:	0.4	t/m3 (al inicio de la operación)
K=	0.7	

Caudal de lixiviados=	0.26	l/s en cada zanja
	0.26	l/s en todas las zanjas

CAUDAL DE AGUA LLUVIA EN UNA ZANJA AL INICIO DEL LLENADO CON DESECHOS

Caudal sobre la zanja en el punto de descarga del Dren a la red principal (D2):

Q= C I A/0.36

Q: Caudal de aguas lluvias (l/s)

C: Coeficiente de escurrimiento C= 0.5

I: Intensidad de lluvia (mm/h)

A: Área de aporte (ha) A= 0.3911

0.36 Factor de concordancia de unidades

A= 3911 m2

Longitud= 90 m

Ancho= 32 m

Desnivel= 1.912 m

7856.23 m2

$I = 103.2125 \times T^{0.2620} \times tc^{-0.3919}$

T: Período de retorno (años) T= 5 años

tc: Tiempo de concentración (minutos)

Método Kerby

$tc = K (L \times n)^{0.467} S^{-0.235}$ tc_1= 4.46 min

tc: Tiempo de concentración (min)

K: k= 1.44

L: Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (pies)

n: Coeficiente de rugosidad del cauce 0.045 Norma SENAGUA (canal excavado)

S: Pendiente promedio del cauce 2 %

Intensidad máxima de agua lluvia: I= 87.59 mm/h

Caudal máximo de agua lluvia: Q= **47.58 l/s** Para el diseño del colector

Volumen de agua lluvia en tc_1: V= 12.73 m3

CUADRO N° 46: INTENSIDAD DURACIÓN FRECUENCIA ESTACIÓN M0138 PAUTE

INAMHI

ESTACIÓN		INTERVALOS DE TIEMPO (minutos)	ECUACIONES	R	R^2
CÓDIGO	NOMBRE				
M0138	PAUTE	5<30	$i = 103.2125 * T^{0.2620} * t^{-0.3919}$	0.9732	0.9472
		30<120	$i = 262.0571 * T^{0.2563} * t^{-0.6679}$	0.9779	0.9563
		120<1440	$i = 719.77 * T^{0.2543} * t^{-0.8795}$	0.9939	0.9878

5.1.5.6 El sistema de micro drenaje se dimensionará para el escurrimiento cuya ocurrencia tenga un período de retorno entre 2 y 10 años, seleccionándose la frecuencia de diseño en función de la importancia del sector y de los daños y molestias que puedan ocasionar las inundaciones periódicas.

SENAGUA CO 10.07 - 601

El enfoque Kerby y Kirpich requiere comparativamente pocos datos de entrada. Además, es sencillo de aplicar y da resultados de fácil interpretación.

Para determinar la capacidad hidráulica máxima de los canales, se estimó el tiempo de concentración empleando las siguientes fórmulas:

$$t_c = K(l * n)^{0.467} S^{-0.235}$$

L: Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (pies)

n: Coeficiente de rugosidad del cause

S: Pendiente promedio del cauce principal (pies/pies)

t_c: Tiempo de concentración (min)

Ambos coeficientes son representados con la variable K y según el método aplicado se tienen valores de 1.44 para el método de (Kerby, 1959) / (Hathaway, 1945) y 0.0195 aplicado al método de (Kirpich, 1940).

LITERATURA (Fase 2)

DISEÑO DEL DRENAJE DE LIXIVIADOS

POZO	LONGITUD		Caudal lixiviado		Caudal de infiltración		Caudal de	DISEÑO DE LA TUBERIA								POZO
	Abscisa	Tramo	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	Diseño	D	J	LLENA V	LLENA Q	q/Q	v/V	d/D	v	
		(m)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mm)	(%)	(m/s)	(l/s)				(m/s)	
D0	0+000.00		0.044													D0
		15.00		0.044			0.044	200	4.00	2.5	78	0.00	0.13	0.02	0.32	
D1	0+015.00		0.044													D1
		15.00		0.087			0.087	200	4.00	2.5	78	0.00	0.18	0.03	0.44	
D2	0+030.00		0.044													D2
		15.00		0.131			0.131	200	4.00	2.5	78	0.00	0.18	0.03	0.44	
D3	0+045.00		0.044													D3
		15.00		0.174			0.174	200	4.00	2.5	78	0.00	0.21	0.04	0.52	
D4	0+060.00		0.044													D4
		15.00		0.218			0.218	200	4.00	2.5	78	0.00	0.21	0.04	0.52	
D5	0+075.00		0.044													D5
		15.00		0.262			0.262	200	4.00	2.5	78	0.00	0.23	0.04	0.57	
D6	0+090.00		0.044													D6
		1.70		0.262			0.262	200	4.00	2.5	78	0.00	0.23	0.04	0.57	
P1	0+091.70		0.044													P1
		14.00		0.262			0.262	200	4.00	2.5	78	0.00	0.23	0.04	0.57	
P2	0+105.70		0.262													P2

n Manning= 0.011 PVC
Infiltración= 0.3 l/s/km

COMPROBACIÓN PARA FUNCIONAMIENTO EN ÉPOCA DE LLUVIA

POZO	LONGITUD		CAUDAL DE AGUAS LLUVIAS							Caudal de infiltración		Caudal de	DISEÑO DE LA TUBERIA									POZO
	Abscisa	Tramo	Area	Tiempo de	Coef.	AREA EQUIVALENTE		I/0,36	CAUDAL	Parcial	Acumulado	Diseño			LLENA		Tiempo	q/Q	v/V	d/D	v	
			Parcial	concentra.	Escurri-	Parcial	Acumulada						D	J	V	Q	de flujo					
		(m)	(ha)	(min)	miento	(ha)	(ha)	(l/s/Ha)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(l/s)	(mm)	(%)	(m/s)	(l/s)	(min)				(m/s)	
D0	0+000.00		0.07																			D0
		15.00		4.46	0.50	0.03	0.03	385.30	12.56	0.005	0.005	12.56	200	4.00	2.5	78	0.10	0.16	0.73	0.27	1.80	
D1	0+015.00		0.07																			D1
		15.00		4.56	0.50	0.03	0.07	380.65	24.81	0.005	0.005	24.82	200	4.00	2.5	78	0.10	0.32	0.89	0.39	2.20	
D2	0+030.00		0.07																			D2
		15.00		4.66	0.50	0.03	0.10	376.15	36.78	0.005	0.009	36.79	200	4.00	2.5	78	0.10	0.47	0.99	0.48	2.45	
D3	0+045.00		0.07																			D3
		15.00		4.76	0.50	0.03	0.13	371.80	48.47	0.005	0.014	48.48	200	4.00	2.5	78	0.10	0.62	1.06	0.57	2.62	
D4	0+060.00		0.07																			D4
		15.00		4.86	0.50	0.03	0.16	367.60	59.90	0.005	0.018	59.92	200	4.00	2.5	78	0.10	0.77	1.10	0.66	2.72	
D5	0+075.00		0.07																			D5
		15.00		4.96	0.50	0.03	0.20	363.52	71.09	0.005	0.023	71.11	200	4.00	2.5	78	0.10	0.92	1.13	0.75	2.79	
D6	0+090.00		0.00																			D6
		1.70		4.98	0.50	0.00	0.20	362.88	70.96	0.001	0.023	70.98	200	2.00	1.7	55	0.02	1.30	1.10	0.95	1.91	
P1	0+091.70		0.00																			P1
		14.00		5.12	0.50	0.00	0.20	357.70	69.95	0.004	0.027	69.97	200	2.00	1.7	55	0.13	1.28	1.10	0.95	1.91	
P2	0+105.70		0.00																			P2

n Manning= 0.011 PVC 0.39
Infiltración= 0.3 l/s/km

ANEXO 6. CÁLCULO GEOMEMBRANA

DISEÑO DEL GEOTEXTIL DE PROTECCIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE FONDO

DESCRIPCIÓN	VALOR	OBSERVACIONES
1.- Datos de entrada		
Peso específico en kg/m3	800	(Des. + mat. de cob. + descomp. + humedad) dato de campo
Peso específico en N/m3 (1 kg = 9,8 N)	7840	Conversión de unidades kg a Newton
Altura de relleno en metros	8	3 terrazas de 8 m cada una
2.- Factor de Seguridad Global para el punzonamiento de la geomembrana (FS)		
FS = (Presión admisible) / (Presión requer	› 2	Debe ser mayor a 2
3.- Presión admisible = Padmisible = (Presión última) x (1 / (FMS x FMDR x FMA)) x (1 / (FRFL x FRDQB))		
Fuerza última, valor proporcionado por el fabricante en catálogos	Fu	Resistencia al punzonamiento, prueba ASTM D 4833 se expresa en Newtons (N).
Área del equipo de prueba ASTAM D 4833	0.00159	Diámetro interior 45 mm
Presión última = Pu = Fu / Área	Fu/0.00159	Expresada en N/m2
FMS = Factor de Modificación por la Forma de la Protuberancia	0.5	Tabla 14.2 - forma semiredondeada
FMDR = Factor de Modificación por Densidad del Relleno	0.67	Tabla 14.3 - compacta, 25 mm
FMA = Factor de Modificación por Efecto de Arco en Sólidos	0.5	Tabla 14.4 - geoestático moderado
FRFL = Factor de Reducción por Fluencia a largo plazo	1.5	Tabla 14.5 - mayor valor inclusive sin geotextil
FRDQB = Factor de Reducción por Degradación Química y Biológica a largo plazo	1.5	Tabla 14.6 - para lixiviado agresivo
Producto total de Factores	0.377	(FMS*FMDR*FMA*FRFL*FRDQB)
Presión admisible: (Fu/0,00159)/0,377	(Fu/0,000599)	Expresada en N/m2
ç		
Presión requerida en (kN/m2)	62720	(Peso específico en N/m3) x (Altura relleno en m)
5.- Factor de Seguridad Global		
FS = (Padmisible) / (Prequerida) = (Fu/0,000599) / (605052,00) > 2	› 2	Requisito técnico que debe cumplir el proveedor
6.- Cálculo de la Fuerza última (Fu) que debe cumplir el fabricante en Newtons	75.14	Despejando del numeral 5

Resumen: el geotextil será del tipo “No tejido, punzonado por agujas” con una fuerza última o resistencia al punzonamiento de mínimo **75,14** Newtons de acuerdo con la prueba ASTM D 4833 o similares. Además, el geotextil deberá cumplir con los requisitos y especificaciones mínimas establecidos por el Instituto de Investigaciones Geosintéticas (GRI).

DISEÑO DEL GEOTEXTIL DE PROTECCIÓN DE LA GEOMEMBRANA DE FONDO

Función principal: Protección - Resistencia

FÓRMULA PARA CALCULAR EL ESPESOR (t) DE LA GEOMEMBRANA

t= (∂nX (tagδu + tagδL)) / (∂adm(cosβ - senβtagδL))

DESCRIPCIÓN	VALOR	OBSERVACIONES
1.- Datos para el cálculo		
Talud de cortes en el terreno	2H : 1V	Angulo de 37.5686°
"β = ángulo de inclinación del terreno" ; tag β	0.5	tangente en radianes
β = 37,5686°	0.463647609	Angulo en radianes
Altura del corte (H) m	4	
Peso específico (desechos + mat. cobertura) en kg/m3 1470 Dato	800	Dato obtenido en prueba de campo
Peso específico en kN/m3 (1 kg = 9,8 N)	7.84	Conversión de unidades kg a Newton
"∂n = Peso específico x Altura" esfuerzo aplicado por el material de relleno en KN/m2	31.36	
El ángulo "δL" es de 32°	0.558505361	Porque la geomembrana será texturizada y además en su parte inferior se colocará un geotextil no tejido
Para el ángulo "δu" se toma 30°	0.523598776	Se asume como si se pusiera una capa de 30 cm de arena encima de la geomembrana
"X = 50 mm = 0,05 m" distancia más desfavorable para movilización de la geomembrana	0.05	mínimo en el manual de Pavco
"∂adm = 15000 kPa" esfuerzo máximo soportado por las geomembranas de HDPE	15000	Fabricante
2.- Cálculos		
tag δu	0.577350269	
tag δL	0.624869352	
cosβ	0.894427191	
senβ	0.447213595	
Numerador 8,659596078	1.885080366	
Denominador 6174,520903	9224.656821	
t (en m) 0,001402473	0.000204352	
t requerido en mm	0.2044	
3.- Espesor asumido para la geomembrana a instalarse		
"t"	0.2	Para mejorar características de supervivencia y resistencia al punzonamiento
4.- Cálculo del Factor de Seguridad FS = (t a instalarse / t requerido) › 1	0.9787	Debe ser mayor a 1

ANEXO 7. MANUAL DE OPERACIONES

II

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 3

2. OBJETIVOS DEL MANUAL 3

3. DEFINICIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO 3

3.1. Operación 3

3.2. Mantenimiento 4

3.3. Tipos de mantenimiento 4

3.3.1. Preventivo 4

3.3.2. Correctivo 4

4. COMPONENTES DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 4

a) Área de cobertura 4

b) Tipos de desechos 5

c) Almacenamiento temporal 6

d) Recolección y transporte 6

e) Relleno sanitario 8

5. DESCRIPCIÓN DEL RELLENO SANITARIO MANUAL 8

6. OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO 10

6.1. Ingreso y registro de los desechos sólidos 10

6.2. Descarga de los desechos 11

6.3. Disposición final de los desechos sólidos 11

6.3.1. Celdas en Área 11

6.4. Operación en época de lluvias 13

6.5. Sistemas de drenaje de líquidos 13

6.6. Sistema de drenaje de gases 13

□ Humedales artificiales 14

b) Humedales artificiales 15

6.9. Monitoreo del lixiviado 16

6.10. Monitoreo de aguas subterráneas 16

6.11. Control de vectores 16

6.12. Prevención y protección contra incendios 17

7. PROGRAMA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO 17

8. RECURSOS HUMANOS Y FUNCIONES 17

9. EQUIPOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES 18

9.1. Equipos 18

9.2. Herramientas 18

9.3. Materiales 19

10. SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO 19

10.1. Prevención de accidentes y medidas de seguridad 20

10.2. Equipos de Protección Personal EPPs 20

10.3. Botiquín de primeros auxilios 21

11. RELACIONES CON LA COMUNIDAD 22

 SUPERVISIÓN Y CONTROL 22

Tabla de Tablas

Tabla 1. Rutas, frecuencias y horarios de recolección 8

Tabla 2. Ficha de control de ingreso y salida de vehículos del relleno sanitario. 11

Tabla 3. Celdas de desechos, método de área 12

Tabla 4. Programa de mantenimiento preventivo. 17

Tabla 5. Equipos y usos en el Relleno Sanitario 18

Tabla 6.Herramientas y usos en el Relleno Sanitario 19

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Cantón Paute 5

Ilustración 2. Usuarios de recolección de basura 6

Ilustración 3. Perfil de avance de las celdas y plataformas 13

Ilustración 4. Implantación del humedal artificial. 15

1. INTRODUCCIÓN

El Relleno Sanitario es una técnica utilizada para la disposición final de los desechos o residuos sólidos bajo o sobre el nivel del terreno natural, cuenta con varias obras de ingeniería cuyo objetivo es eliminar o reducir los impactos negativos en la salud pública y en el medio ambiente, inclusive luego de su clausura.

El presente documento expone los criterios básicos para la operación y mantenimiento del Relleno Sanitario de Paute, su contenido se sustenta en la experiencia obtenida por el GAD Municipal de Paute en el manejo del actual lugar de disposición final de la basura, así como en proyectos similares y en las recomendaciones existentes en la literatura disponible sobre el tema.

La vida útil de un Relleno Sanitario puede reducirse significativamente por la falta de operación y mantenimiento apropiados de la infraestructura diseñada y construida, la importancia de estas acciones crece y evolucionan con el transcurso del tiempo, pues, la cantidad de residuos se incrementa a medida que una población crece, tanto en habitantes como en extensión.

Las deficiencias que podrían presentarse durante la operación elevarán el riesgo de que el Relleno Sanitario se transforme en un botadero a cielo abierto, fuente de contaminación para la salud pública y el medio ambiente en su área de influencia.

2. OBJETIVOS DEL MANUAL

El presente documento tiene los siguientes objetivos:

- Guiar al personal para la ejecución de los trabajos de Operación y Mantenimiento en las instalaciones del Relleno Sanitario
- Control de parámetros ambientales indicadores de la calidad de la gestión.
- Establecer la periodicidad de las actividades.
- Dar a conocer las medidas de seguridad que deben adoptarse para precautelar la integridad del personal.

3. DEFINICIONES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

3.1. Operación

Conjunto de acciones desarrolladas para conseguir el funcionamiento propuesto en los estudios y diseños, la operación entonces estará complementada por inspecciones de control y verificación del estado, así como del funcionamiento de la infraestructura. Las acciones de operación no alteran las partes constitutivas de los sistemas.

3.2. Mantenimiento

Conjunto de acciones que se desarrollan para prevenir posibles daños o para la repararlos cuando éstos ya se produjeron. Las acciones de mantenimiento afectan o modifican de alguna manera la naturaleza de los componentes.

3.3. Tipos de mantenimiento

3.3.1. Preventivo

Consiste en una serie de acciones que se deben realizar para evitar el deterioro y daños en las instalaciones y equipos, el mantenimiento preventivo se realiza en forma programada e ineludible ya que constituye la única garantía para asegurar el buen funcionamiento de un sistema, su aplicación genera una gran economía.

3.3.2. Correctivo

Es la reparación inmediata y oportuna de daños que se produzcan en un sistema, éstos pueden ser de origen y naturaleza variada por lo que ocurren en el momento menos esperado y sin previo aviso, entonces el mantenimiento correctivo no puede programarse por lo que es necesario contar con un plan de contingencias.

4. COMPONENTES DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

Para definir los programas de operación y mantenimiento es importante disponer de información actualizada sobre los componentes del sistema de GIRS, el presente proyecto involucra las actividades desde la generación hasta la disposición final:

- Barrido y limpieza de vías y áreas públicas
- Almacenamiento temporal
- Recolección
- Transporte
- Reciclaje
- Disposición final en un relleno sanitario manual

El personal debe recibir la capacitación necesaria, conocer en forma por lo menos general la propuesta de la GIRS y en forma detallada las actividades que están directamente bajo su responsabilidad.

En lo referente al Relleno Sanitario debe contar con los planos de construcción “As-Built” donde constarán detalladamente todos elementos que lo conforman.

a) Área de cobertura

El área de servicio incluye a las parroquias, Paute (cabecera cantonal), Guarainag,

Tomebamba, Dug Dug, Bulán, Chicán, El Cabo, San Cristobal.

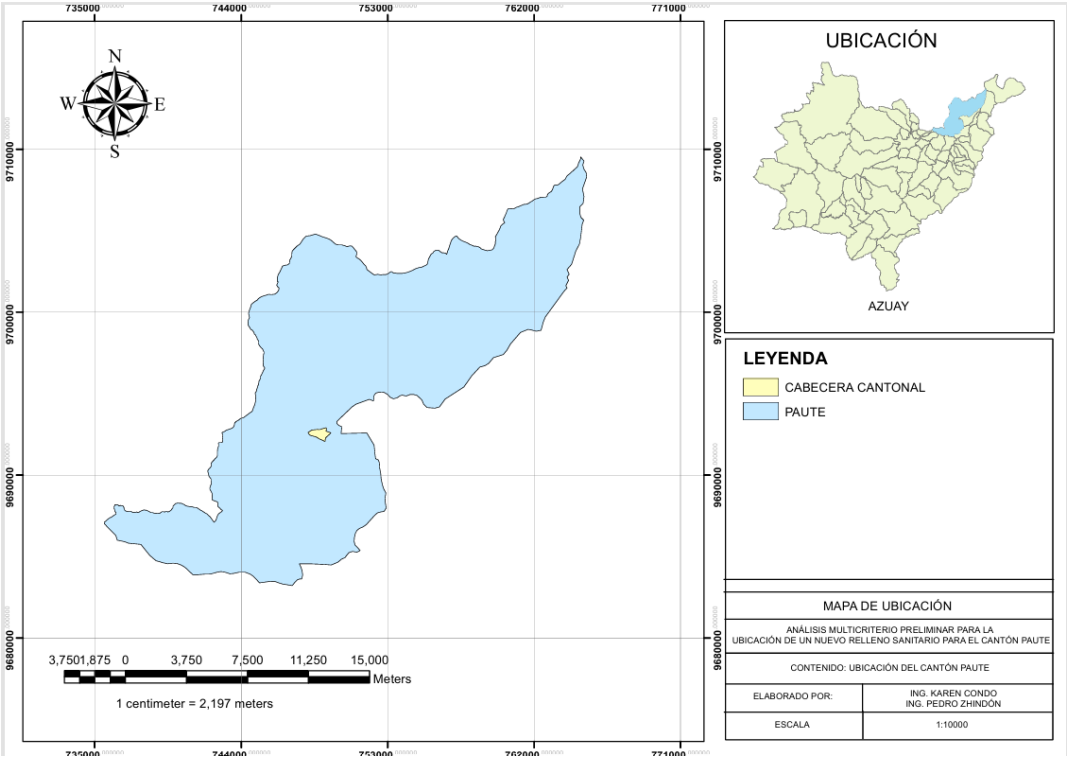


Ilustración 1. Cantón Paute

b) Tipos de desechos

Los tipos de desechos incluidos en la GIRS son:

- **Desechos no peligrosos:** Denominados también comunes, se incluyen en esta categoría a los residuos domiciliarios, comerciales y otros similares que no presenten ninguna de las características descritas para los residuos peligrosos. Se clasifican en residuos orgánicos, inorgánicos y reciclables.
- **Desechos peligrosos:** Son residuos que poseen alguna de las características que representan un peligro para la salud pública y el ambiente en general, tales como: Corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infecciosas.

  Los desechos que se aceptarán en la GIRS para la recogida, transporte y disposición final serán únicamente los de origen hospitalario generados en los Centros de Salud, Dispensarios Médicos, laboratorios clínicos y consultorios existentes en el área de cobertura; quienes deberán cumplir con las normas de seguridad cumpliendo la normativa vigente para su almacenamiento temporal, previo a la recolección.

c) Almacenamiento temporal

El proyecto de GIRS propone realizar el almacenamiento temporal separando los residuos no reciclables, orgánicos o putrescibles y reciclables.

- En los domicilios de la ciudad de Paute se promoverá el almacenamiento de residuos reciclables por separado.
- En los espacios públicos se continuarán utilizando los recipientes para el reciclaje de botellas plásticas.
- En las comunidades rurales y en la vía Transversal Interoceánica se mantendrán los contenedores estacionarios para servir a sectores inaccesibles a la recolección convencional.
- En los mercados los residuos se almacenarán en contenedores.
- En los establecimientos de salud se mantendrá el almacenamiento de los desechos peligrosos en recipientes o contenedores especiales, según la normativa vigente.

d) Recolección y transporte

Para la recolección de los residuos sólidos no peligrosos se han determinado las rutas, frecuencias y horarios.

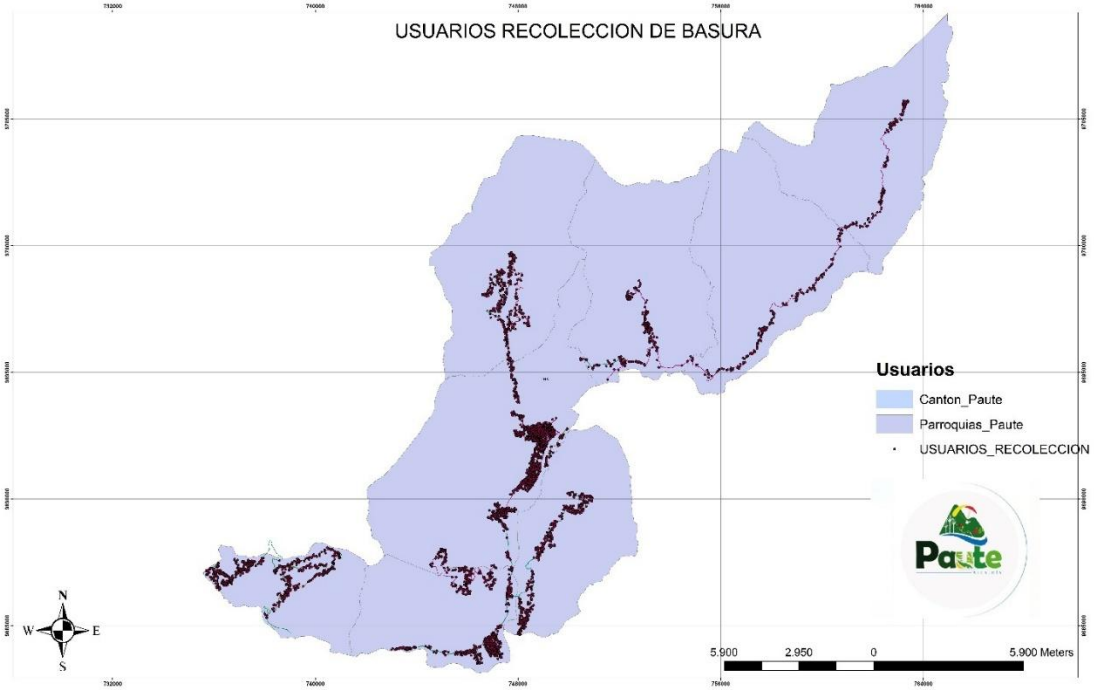


Ilustración 2. Usuarios de recolección de basura

Elaborado por: Técnicos del GAD Municipal de Paute.

RECOLECCIÓN DIURNA PARROQUIAS Y COMUNIDADES			**RECOLECCIÓN NOCTURNA CENTRO Y PERIFERIAS**	
HORA	**DÍA**	**RUTAS**	**HOR**	**RUTAS**
8:00 -15:00	***Lunes***	La Higuera, El Cabo, Puente Europa, La Estancia, Chican,	17:00 - 21:00	Paute Centro.
	Miércoles		15:00 - 21:00	Circunvalación, Paute Centro - Parque Lineal
08:00-15:00	***Jueves***	Tutucán, Padrehurco, Bulán, Tambillo, Guayan, Cachiyacu, Pastopamba, San Cristóbal, Cantagallo, La Ramada, Pueblo Nuevo, Pampa Negra, Bellavista, La Victoria, Descanso		
8:00 -15:00	***Viernes***	La Higuera , El Cabo - Bellavista Puente Europa, Chican	17:00 - 21:00	Paute Centro. -Parque Lineal
16:00 -20:00	***Sábado***	Mercado 26 de Febrero – Mercado San José, Parque Lineal y El Descanso		
HORARIO DE RECOLECTOR HINO				
CALENDARIO DE RECOLECCIÓN				
RECOLECCIÓN DIURNA PARROQUIAS Y COMUNIDADES			**RECOLECCIÓN NOCTURNA CENTRO Y PERIFERIAS**	
Hora	Día	Rutas	Hora	Rutas
8:00 –15:00	***Lunes***	Tutucan, Bulán, Sumán, Padrehurco, Tambillo, Guayan, Pastopamba, San Cristóbal, Tuzhpo, La Ramada, Pueblo Nuevo, Pampa Negra, Bellavista, La Victoria, El Descanso	17:00 – 21:00	Ciudadela Don Bosco, Terminal Terrestre, Huayna Capac, India Pau, Escuela Isidro Ayora, Escuela Simón Bolívar, Colegio 26 de Febrero, Ciudadela los Sauces, Destilería, Ciudadela Solidaridad, Jardines de Paute, Las Peñas, 11 de Febrero, Pirincay, Ciudadela las Praderas- Zhumir.
08:00 – 15:00	***Martes***	Guarainag, Tuncay, Tomebamba, Toctehuayco, Dug, Huachi, Lazul, Sadarnal, Zhinquir, La Virginia, Zhumir Alto, Huacas, Villaflor, Tacapamba, Llapzhun.		
	Miércoles		15:00 - 21:00	Ciudadela Don Bosco, Terminal Terrestre, Huayna Capac, India Pau, Escuela Isidro Ayora, Escuela Simón Bolívar, Colegio 26 de

				Febrero, Ciudadela los Sauces, Destilería, Ciudadela Solidaridad, Jardines de Paute, Las Peñas, 11 de Febrero, Pirincay, Ciudadela las Praderas- Zhumir
8:00 -15:00	***Viernes***	Guarainag-Tuncay-Tomebamba Toctehuayco-Dugdug- Huachi-Lazul Sadarnal- Zhinquir-La Virginia Zhumir Alto-Huacas-Villaflor Tacapamba-Llapzhun	17:00 - 21:00	Ciudadela Don Bosco, Terminal Terrestre, Huayna Capac, India Pau, Escuela Isidro Ayora, Escuela Simón Bolívar, Colegio 26 de Febrero, Ciudadela los Sauces, Destilería, Ciudadela Solidaridad, Jardines de Paute, Las Peñas, 11 de Febrero, Pirincay, Ciudadela las Praderas- Zhumir
14:00 - 17:00	***Domingo***	Mercado 26 de Febrero - Mercado San José – Parque Lineal.		
19:00 - 23:00		Mercado 26 de Febrero – Mercado San José		

Tabla 1. Rutas, frecuencias y horarios de recolección

Fuente: Técnicos, GAD Municipal de Paute.

e) Relleno sanitario

El relleno sanitario se prevé ubicarlo en el sector San Cristobal siguiendo la vía que conduce a la Parroquia San Cristobal, la distancia desde el terreno hasta la vía principal es de 240 m.

5. DESCRIPCIÓN DEL RELLENO SANITARIO MANUAL

La operación prevista para el relleno sanitario es de tipo mecánico, sus principales características y componentes son:

a) Ubicación:

- Sector Subida a San Cristóbal.
- Distancia 5,5 km del centro de la ciudad de Paute.
- El acceso desde la vía principal es de 240 m.
- Extensión: 7 hectáreas.

b) Vía de acceso:

- Longitud: 240 m.

- Ancho: 6 m.
- Capa de rodadura: Lastre
- Cunetas

c) Edificaciones:

El relleno sanitario contará con las siguientes áreas:

- Pesaje de vehículos y desechos
- Reciclaje
- Almacenamiento de materiales recuperados

Se recomienda establecer áreas administrativas para llevar un mejor control de las operaciones que se realicen dentro del relleno sanitario.

d) Áreas para disposición final:

El método seleccionado para la construcción de las celdas de desechos sólidos no peligrosos es el de áreas.

- Área para construir celdas sobre los desechos previos.

e) Manejo de lixiviados:

- Drenaje y evacuación desde las zanjas
- Tratamiento de lixiviados
- Descarga del efluente

f) Manejo de gases:

- Chimeneas

Se recomienda implementar sistemas de quema de gases para minimizar las emisiones de gas metano.

g) Drenaje de aguas lluvias:

- Cunetas perimetrales
- Colector para descarga al efluente

h) Obras complementarias:

- Vías interiores
- Plataforma para maniobra de los vehículos y acopio de materiales de cobertura, desechos y construcción.

En el gráfico siguiente se presenta la implantación del Relleno Sanitario.

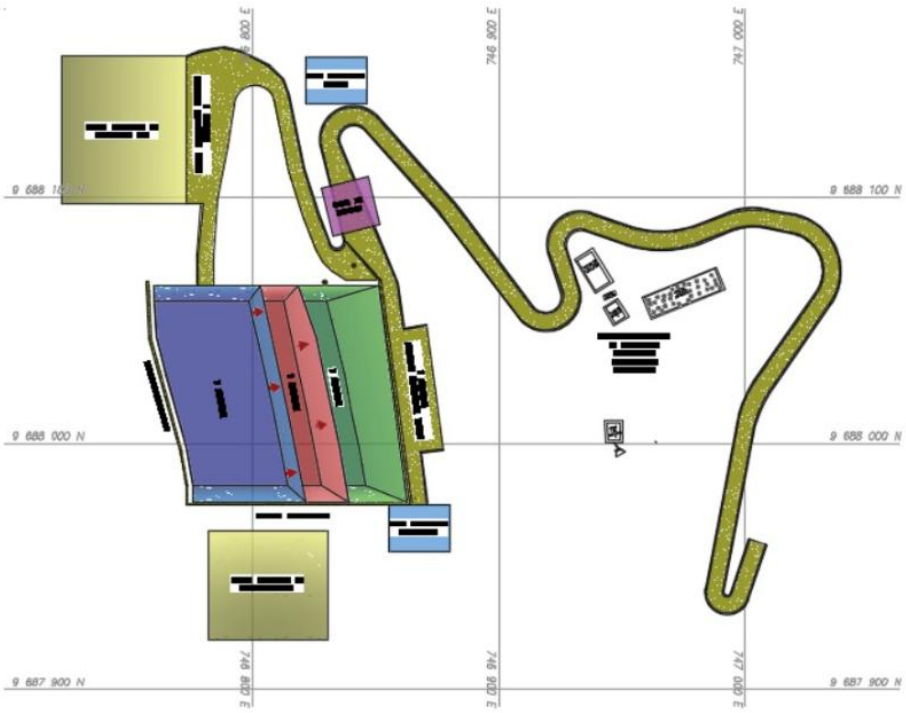


Ilustración 3. Implantación general del Relleno Sanitario

6. OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO

El programa o plan de operación del relleno sanitario mecánico presupone que todas las obras de infraestructura descritas anteriormente se encuentran construidas y listas para el inicio de la descarga de los desechos o residuos sólidos. Como se indicó, la operación incluye también inspecciones de control y verificación del estado y funcionamiento de la infraestructura. Las actividades más relevantes son:

- Ingreso y registro de vehículos
- Descarga de los desechos
- Construcción de las celdas de residuos
- Operación en época de lluvias
- Sistemas de drenaje de lixiviado y gases
- Tratamiento de lixiviados
- Limpieza y control de vectores en el relleno sanitario

6.1. Ingreso y registro de los desechos sólidos

Para el control de ingreso de los desechos sólidos al relleno sanitario se elaborará un registro con la siguiente información:

- Fecha
- Identificación del vehículo: Placa o número

- Procedencia: Número de ruta u otro origen
- Tipo de desechos sólidos
- Horas de ingreso y salida
- Toma de pesos de ingreso y salida de los vehículos
- Comentarios u observaciones Se propone el formato siguiente:

RELLENO SANITARIO **CONTROL DE INGRESO Y SALIDA DE VEHÍCULOS**								
Fecha	Vehículo	Origen	Tipo de desechos	Ingreso		Salida		Observación
				Hora	Peso	Hora	Peso	

Tabla 2. Ficha de control de ingreso y salida de vehículos del relleno sanitario.

6.2. Descarga de los desechos

Cumplido el protocolo de ingreso, se instruirá al conductor para la descarga de los residuos en el área correspondiente según el tipo de desechos:

- No peligrosos: Orgánicos, reciclables y no reciclables.

6.3. Disposición final de los desechos sólidos

El método previsto para la disposición final de los desechos es en áreas, es decir mediante el método de áreas, se ha previsto que, una vez agotada la capacidad volumétrica de cada área, se eleve el relleno sobre sus terrazas según la proyección establecida actualmente.

A continuación, se describe la secuencia de avance de la construcción del relleno.

6.3.1. Celdas en Área

Sobre las plataformas se elevarán las celdas de desechos aplicando el método de área, como se indica en las gráficas siguientes.

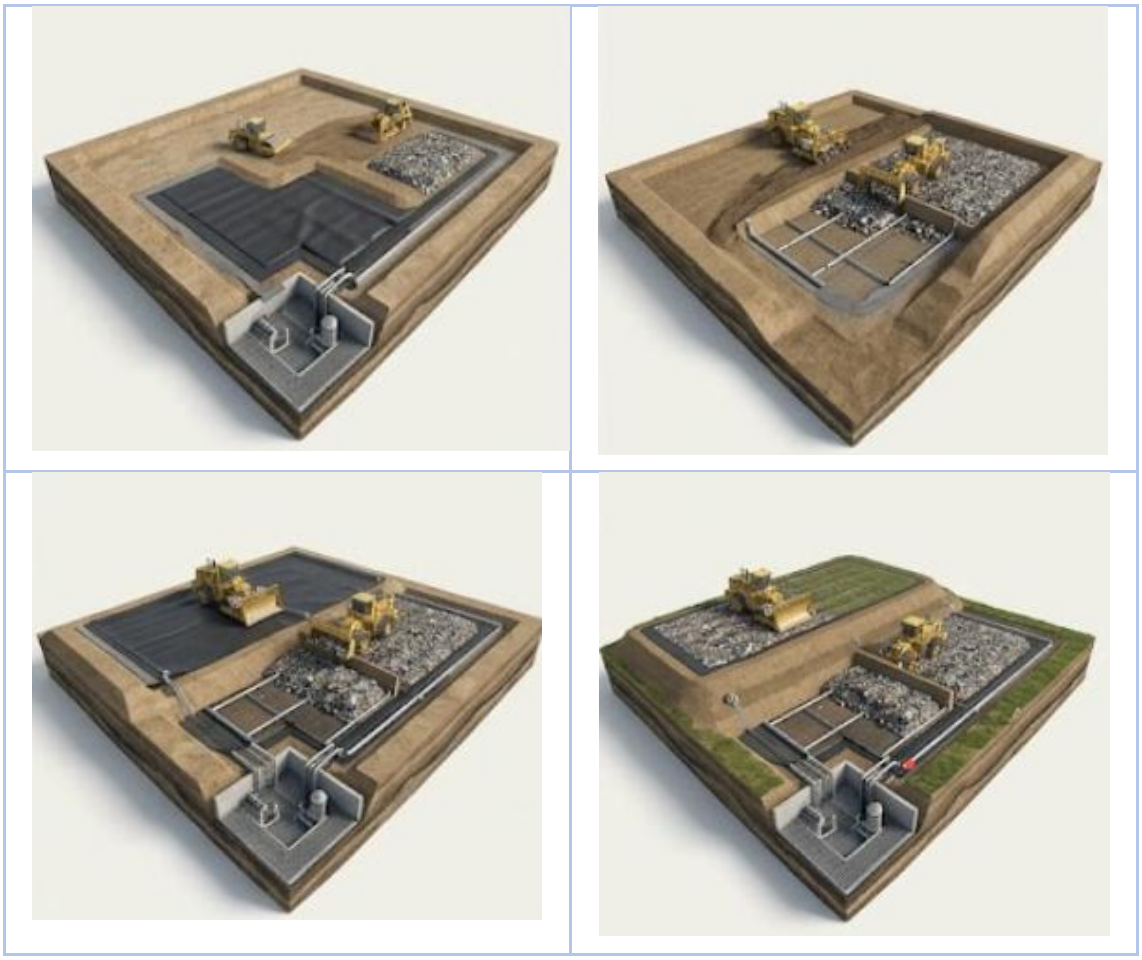


Tabla 3. Celdas de desechos, método de área

Método de Área Secuencia propuesta para la construcción:

- Primera plataforma de celdas
- Primera *celda esquinera*
  - Se continúa en el sentido transversal del área hasta cubrir todo su ancho, obteniéndose la primera franja de celdas.
  - Se repite el proceso hasta construir la cuarta o quinta franjas de celdas
  - Segunda plataforma de celdas sobre la primera, siguiendo un proceso similar.
    - Tercera plataforma de celdas sobre la segunda, siguiendo un proceso similar. El propósito de esta "primera fase" de secuencia es procurar el avance del relleno en forma vertical para mantener un frente centralizado dentro del área, como se indica en la ilustración. El avance de la plataforma inferior servirá para la conformación de las plataformas superiores.

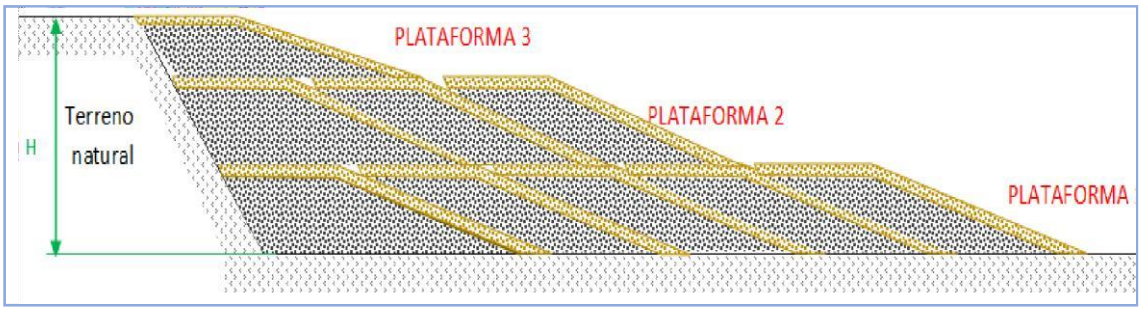


Ilustración 3. Perfil de avance de las celdas y plataformas

Posteriormente se repite el ciclo prolongando las plataformas para recibir la descarga de desechos y conformar las celdas.

6.4. Operación en época de lluvias

Para reducir los inconvenientes se deben observar las recomendaciones siguientes:

- Cubrir total o parcialmente el frente del relleno y el material de cobertura con plástico.
- Mantener áreas de trabajo cortas, propiciando el avance más horizontal que vertical.
- Programar el transporte de material de cobertura en períodos secos

6.5. Sistemas de drenaje de líquidos

En los sistemas drenaje de lixiviado y aguas lluvias se realizarán inspecciones para constatar el estado y funcionamiento de las estructuras. En general deben realizarse, antes, durante y después de los eventos lluviosos.

- Antes: Para verificar que la tapa del pozo de revisión esté correctamente colocada para evitar el ingreso de agua lluvia por ésta y, que las cunetas estén limpias para facilitar el flujo de estas.
- Durante: Para determinar cualitativamente la variación de caudales y que el agua fluya según lo previsto en los diseños hacia los sitios de descarga.
- Después: Para establecer posibles afectaciones y determinar el tipo de mantenimiento correctivo requerido.
- Las inspecciones serán visuales a través de las cajas, pozos de revisión y descarga al cuerpo receptor.

6.6. Sistema de drenaje de gases

En las chimeneas para la evacuación de gases deberá comprobarse la estabilidad y verticalidad de la estructura de soporte del material pétreo, así como de los elementos de descarga a la atmósfera y quema del gas.

El movimiento de los gases en un relleno tiene particular importancia para el control operacional y posible mantenimiento del sistema, ya que, cuando se encuentra atrapado, la presión interna puede agrietar en la capa del material de cobertura y propiciar el ingreso de agua lluvia y la proliferación de vectores.

6.7. Humedales artificiales

a) Tanque de distribución-Tanque de tormentas- tanque de regulación.

La función principal del tanque de distribución es repartir el flujo de lixiviados de manera uniforme hacia el módulo del humedal artificial. Esto evita sobrecargas puntuales, garantiza un adecuado tiempo de retención hidráulica y mejora la eficiencia del tratamiento. También, permite controlar la entrada del flujo, facilitando labores de operación y mantenimiento.

El tanque de tormentas actúa como una estructura de almacenamiento temporal para manejar incrementos bruscos de caudal, ocasionados por eventos de precipitación intensa. En un relleno sanitario, la generación de lixiviados aumenta considerablemente durante lluvias, este tanque evita que el sistema de humedales se sobrecargue hidráulicamente. Su función es laminar el caudal, almacenando el exceso y liberándolo de forma controlada posteriormente.

El tanque de regulación también conocido como tanque de ecualización, tiene como objetivo homogenizar tanto el caudal como la calidad del lixiviado antes de su ingreso al humedal. Esto incluye la estabilización de parámetros como pH, carga orgánica (DBO/DQO) y concentración de contaminantes. Al reducir las variaciones, se protege el funcionamiento biológico del humedal y se optimiza su rendimiento.

En conjunto, permiten que el sistema opere de manera más controlada, evitando fallas por sobrecarga hidráulica o variaciones extremas en la calidad del lixiviado.

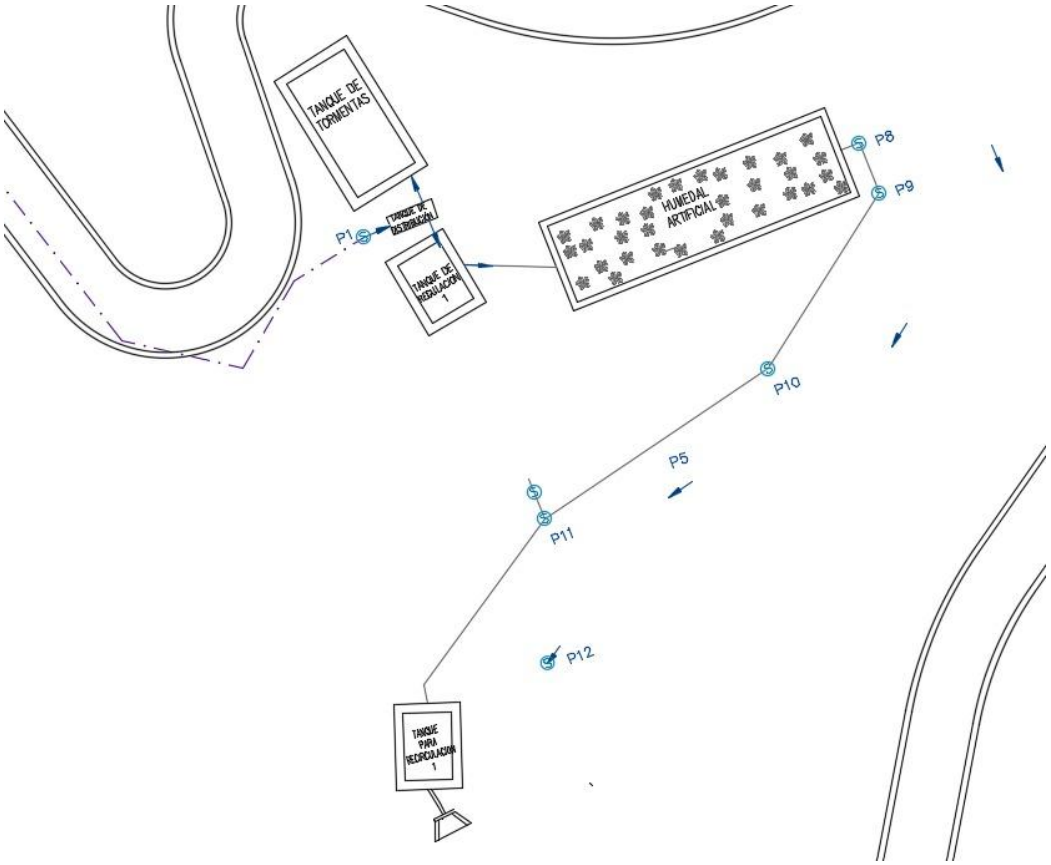


Ilustración 4. Implantación del humedal artificial.

b) Humedales artificiales

Los humedales artificiales en un relleno sanitario cumplen la función principal de tratar los lixiviados mediante procesos naturales controlados, imitando el funcionamiento de los humedales naturales, estos sirven para la remoción de materia orgánica y solidos suspendidos, nitrógeno y fosforo, metales pesados y microorganismos patógenos. Este proceso mediante la interacción de tres componentes principales: sustrato, vegetación (plantas macrófitos) y microorganismos adheridos.

Permiten la estabilización de carga contaminante ya que los procesos que ocurren en su interior funcionan de forma conjunta para reducir la toxicidad del lixiviado antes de su tratamiento complementario.



Ilustración 12. Humedales artificiales.

6.9. Monitoreo del lixiviado

El lixiviado o percolado es un líquido residual que se genera por la descomposición biológica de la basura similar a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado. Su volumen está en función de la cantidad y humedad de la basura orgánica, de las condiciones del clima, especialmente de la precipitación, y de las características o método de construcción de las celdas.

El ciclo del lixiviado se inicia en las celdas que alojan a los desechos, mediante un sistema de drenes y colectores son conducidos al tanque de distribución y luego a los humedales artificiales, el efluente es descargado en un colector para su vertido final en el efluente.

El control del funcionamiento hidráulico fue descrito en numerales anteriores en tanto que, para el monitoreo de calidad fisicoquímica-bacteriológica, se observará lo dispuesto en el TULSMA Libro VI Anexo 6 Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición de Desechos Sólidos No Peligrosos.

Control del proceso de tratamiento de lixiviados:

- Toma de muestras:
  - ✓ Lixiviado tratado en la salida del humedal artificial
- Análisis de laboratorio

6.10. Monitoreo de aguas subterráneas

Según la Normativa citada en el numeral anterior, por las características hidrogeológicas del área del relleno sanitario se realizará el control de calidad del agua subterránea en los pozos de monitoreo dispuestos en el área de influencia del relleno sanitario.

El conjunto Lixiviado – Efluente del Tratamiento – Aguas subterráneas será monitoreado dos veces al año, de esta manera se puede establecer una correlación entre los parámetros que se analicen en laboratorio.

6.11. Control de vectores

Los vectores son animales portadores de microorganismos que transmiten enfermedades a los seres vivos, su presencia puede considerarse como indicadores de un inadecuado manejo de los desechos sólidos.

En los rellenos sanitarios la proliferación de moscas, mosquitos, cucarachas, ratas y aves se evita o minimiza con una perfecta cobertura diaria de los desechos sólidos, el personal responsable de esta tarea controlará el estado de las celdas ya conformadas para reponer eventuales “lavados” del material de cobertura ocasionados por las lluvias, especialmente en los taludes de las celdas.

Si por alguna circunstancia imprevista en la jornada diaria quedan desechos sin material de cobertura, será necesario cubrirlos con plástico hasta su entierro definitivo.

La utilización de insecticidas debe evitarse ya que contaminan el ambiente y pueden inhibir el proceso biológico de degradación de la materia orgánica y la depuración del lixiviado.

6.12. Prevención y protección contra incendios

La quema de materiales y el hábito de fumar deben estar estrictamente prohibido en el relleno sanitario y sus instalaciones, pues, el gas metano que se genera con la descomposición de la materia orgánica es altamente combustible.

En caso de presentarse incendios, éstos serán combatidos con material sin clasificar o de sitio.

7. PROGRAMA PARA MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El programa de mantenimiento preventivo se presenta en la tabla siguiente, resume las actividades y la periodicidad con que deben realizarse. Con el transcurso del tiempo puede sufrir modificaciones en función de la experiencia que irá adquiriendo el personal.

ACTIVIDAD	PERIODICIDAD
Limpieza de la vía de acceso, cunetas y señalética	Semanal
Limpieza de vías internas, cunetas y señalética	Diaria
Recolección de material disperso en la plataforma	Semanal
Recolección de material disperso en el frente de trabajo	Diaria
Corte de maleza	Bimestral
Trabajos de jardinería	Bimestral
Mantenimiento correctivo y preventivo a maquinaria operativa	Trimestral
Reposición y nivelación del material de cobertura de celdas terminadas	Mensual
Limpieza de quemadores de gas	Trimestral
Desalojo de lodos de la planta de tratamiento	Semestral

Tabla 4. Programa de mantenimiento preventivo.

8. RECURSOS HUMANOS Y FUNCIONES

El personal requerido para las actividades de operación y mantenimiento del Relleno Sanitario Mecanizado estará conformado de la siguiente manera:

- Director del sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos

  Sus funciones involucran todo el proceso de manejo de los desechos, desde su generación hasta la disposición final.

Se recomienda implementar los siguientes recursos humanos:

- Guardián, con las funciones siguientes:
  - ✓ Recibir y registrar el ingreso de los desechos sólidos.
  - ✓ Dirigir los vehículos hacia el sitio de descarga de los residuos, según su origen.
  - ✓ Control del ingreso de personas.
  - ✓ Advertir a los visitantes sobre las medidas de seguridad que deben observar en el interior de las instalaciones.
  - ✓ Control y vigilancia de integridad de las instalaciones.
  - ✓ Reportar las anomalías al director de la GIRS
- Obrero, con las funciones principales siguientes:
  - Para apoyo en las tareas de limpieza y en días con mayor ingreso de desechos
  - ✓ Aplicar el presente Manual de Operación y Mantenimiento del relleno
  - ✓ Reportar las anomalías al director de la GIRS
- Operador, sus funciones son:
  - ✓ Manejo de maquinaria pesada dentro del relleno sanitario.
  - ✓ Apoyo a la cuadrilla de obreros
  - ✓ Aplicar el presente Manual de Operación y Mantenimiento del relleno
  - ✓ Reportar las anomalías al director de la GIRS

9. EQUIPOS, HERRAMIENTAS Y MATERIALES

Para realizar las actividades requeridas en el Relleno Sanitario Mecanizado, descritas en el presente documento, se requieren lo siguiente:

9.1. Equipos

Los equipos necesarios para la operación y mantenimiento en las instalaciones del relleno sanitario son:

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	USO
Balanza o báscula de suelo/rampa	1 u	Pesaje de los desechos.
Retroexcavadora sobre orugas	1 u	Compactación por presión de contacto moderada, de 5 a 6 pasadas.
Podadora a gasolina portátil	1 u	Trabajos de jardinería.

Tabla 5. Equipos y usos en el Relleno Sanitario

9.2. Herramientas

Las herramientas son las que comúnmente se utilizan en trabajos de albañilería,

jardinería y carpintería, su duración se estima en un año y son:

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	USO
Pala redonda Pala cuadrada	2 u 2 u	Carga, descarga y colocación de desechos y material de cobertura. Mantenimiento de cunetas.
Pico	2 u	Remoción de material de cobertura, limpieza de cunetas y excavaciones
Barreta	2 u	Aflojar el material de cobertura y excavaciones en general
Machete	2 u	Corte de maleza y corte de madera
Combos de 10 y 5 lb	2 u	Trabajos de albañilería
Tijeras de jardinería	1 u	Mantenimiento de áreas verdes
Caja de herramientas básica	1 u	Mantenimiento

Tabla 6.Herramientas y usos en el Relleno Sanitario

9.3. Materiales

A partir del segundo año aproximadamente, será necesario adquirir materiales para la elevación de las chimeneas de gases, ya que, sobre cada área terminada, se alzarán celdas de desechos, según lo previsto en los diseños.

10. SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO

La Dirección de Seguridad, Salud en el Trabajo y Gestión Integral de Riesgos del Ministerio del Trabajo existe desde que la ley determinara que “los riesgos del trabajo son de cuenta del empleador” y que hay obligaciones, derechos y deberes de cumplimiento técnico – legal en materia de prevención de riesgos laborales, con el fin de velar por la integridad físico – mental de los trabajadores.

La implementación de acciones en seguridad y salud en el trabajo se respalda en el Art. 326, numeral 5 de la Constitución del Ecuador, en Normas Comunitarias Andinas, Convenios Internacionales de la OIT, Código del Trabajo, Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo, Acuerdos Ministeriales.

Por la naturaleza de los trabajos que requieren dentro de la GIRS es necesario implementar acciones tendientes a precautelar la salud de los trabajadores y dar cumplimiento a la normativa jurídica vigente, en materia de seguridad y prevención de riesgos laborales.

Entre los objetivos que persigue un Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo están:

- Mejorar las condiciones de los trabajadores referentes a Seguridad y Salud en el Trabajo.

- Desarrollar consciencia preventiva y hábitos de trabajo seguros en empleadores y trabajadores.
- Disminuir las lesiones y daños a la salud provocados por el trabajo.
- Mejorar la productividad en base a la gestión empresarial con visión preventiva.

10.1. Prevención de accidentes y medidas de seguridad

El personal debe ser recibir periódicamente la capacitación sobre los aspectos básicos de seguridad industrial en la operación y mantenimiento del relleno sanitario mecanizado propuesto, el desconocimiento e incumplimiento de las instrucciones y/o procedimientos son las causas principales de los accidentes en este tipo de proyectos.

En cumplimiento de la legislación de seguridad social, es necesario también establecer un programa periódico de exámenes médicos para poder identificar enfermedades o riesgos potenciales en el personal que labora en el relleno, siendo los recomendables los siguientes:

a) Pre ocupacionales:
   Sangre, RX estándar de tórax y audiometría.
b) Control preventivo anual:
   Sangre, orina, heces, RX estándar de tórax y audiometría.
c) Post ocupacionales:
   Sangre, RX estándar de tórax y audiometría.

Entre las principales medidas de seguridad e higiene que deben cumplirse están las siguientes:

- No ingerir alimentos o bebidas durante la ejecución del trabajo.
- No fumar y consumir bebidas alcohólicas dentro del relleno sanitario.
- El uso de los uniformes y elementos de protección de personal es obligatorio.
- El personal que labore en el relleno sanitario deberá estar vacunado contra el Tétanos y la Hepatitis B.
- No se permitirá el ingreso de mujeres embarazadas o niños menores de 10 años.
- Se dotará de una mascarilla descartable y casco a los visitantes, previo el recorrido del sitio. Al final se deberá desinfectar el calzado, ya sea con cal viva o con una solución de cloro.

10.2. Equipos de Protección Personal EPPs

Para garantizar la seguridad del personal en la ejecución de los trabajos de operación y mantenimiento del relleno sanitario es necesario dotarles de elementos de protección cuyo uso es de carácter obligatorio.

- Ropa de trabajo (pantalón, camisa, casaca y gorro tipo safari)
- Ropa impermeable para épocas de lluvia (pantalón, casaca y casco)
- Guantes de caucho y cuero
- Botas con punta de acero
- Mascarillas tipo barbijo y de filtro
- Gafas transparentes de seguridad
- Protectores auditivos

Al inicio y fin de la jornada de trabajo el personal deberá cambiarse de vestuario, una vez concluida la jornada de trabajo. Además, el personal deberá asearse y/o ducharse en las instalaciones previstas para estos fines. Por ningún concepto un obrero podrá salir con su ropa de trabajo a su hogar.

10.3. Botiquín de primeros auxilios

El botiquín de primeros auxilios estará disponible en todo momento en un sitio de fácil acceso, el personal debe estar capacitado para actuar en casos de emergencias y, por tanto, conocer el contenido del manual de uso del botiquín, mismo que deberá revisarse periódicamente para reponer los medicamentos gastados o caducados.

- ✓ Vendas adhesivas o curitas.
- ✓ Lote de esparadrapos hipo alérgicos.
- ✓ Gasa estéril.
- ✓ Algodón estéril de uso médico.
- ✓ Jaboncillo bactericida para lavar las heridas.
- ✓ Guantes de látex o quirúrgicos
- ✓ Mascarillas de protección o tapabocas.
- ✓ Baja lenguas.
- ✓ Vendas elásticas de todos los tamaños.
- ✓ Alcohol medicinal antiinflamatorio.
- ✓ Agua oxigenada para desinfectar heridas.
- ✓ Suero compuesto de cloruro de sodio y glucosa de un litro.
- ✓ Pinza para extraer astillas o similares.
- ✓ Tijera con punta roma.
- ✓ Imperdibles para vendas
- ✓ Tablilla como férulas, pares de piezas de las dimensiones siguientes: 30 x 5cm, de 6mm; 50 x 5cm, de 6mm; 1 m x 5cm, de 6mm; 1.50 m x 5cm, de

6mm).

- ✓ Vasos de plástico descartables.
- ✓ Toallitas húmedas.
- ✓ Manta o frazada para cubrir al personal afectado.
- ✓ Manual de bolsillo sobre temas de primeros auxilios. Bolsas plásticas y de papel.

11. RELACIONES CON LA COMUNIDAD

Las personas particulares podrán ingresar a las instalaciones del relleno sanitario, únicamente con la autorización del director de la GIRS, las visitas dirigidas permitirán difundir la importancia de estas obras en la conservación del medio ambiente. Es saludable también permitir a los visitantes realizar sugerencias que contribuyan a mejorar las actividades de operación y mantenimiento.

12. SUPERVISIÓN Y CONTROL

La vigilancia de la operación y mantenimiento en el relleno sanitario estará a cargo del director de la Gestión Integral de Residuos Sólidos, quien velará por que se cumpla con los objetivos del proyecto. Entre sus responsabilidades se citan las siguientes:

- ➢ Impartir disposiciones e instrucciones, distribuir apropiadamente las tareas sobre la base de la programación prevista.
- ➢ Velar por la eficiencia y calidad de este servicio, planificando el suministro oportuno de insumos para el buen desempeño de los trabajos.
- ➢ Aplicar los controles necesarios para el funcionamiento de la GIRS.
- ➢ Informar periódicamente sobre el desarrollo de las actividades y anomalías que pudieran presentarse.
- ➢ Llevar registros de entrada de los residuos sólidos.
- ➢ Registrar, analizar y evaluar el avance de ocupación de los espacios destinados a la disposición final.
- ➢ Realizar ajustes de carácter técnico sustentados en la experiencia obtenida en la operación y mantenimiento del proyecto.

ANEXO 8. PRESUPUESTO

PRESUPUESTO					
Ítem	**Descripción**	**Unidad**	**Cantidad**	**P.Unitario**	**P.Total**
1	**VIA DE INGRESO**				**17,728.580**
1.1	Replanteo y nivelación de ejes	m	530.00	0.80	424.00
1.2	Excavación y encauzamiento a máquina, zanja (Transp. libre 500m)	m3	53.00	5.50	291.50
1.3	LASTRADO (MATERIAL, TENDIDO Y COMPACTADO)	m3	636.00	18.50	11,766.00
1.4	Transporte de material hasta 5km	m3	53.00	3.50	185.50
1.5	Relleno compactado con material de excavacion	m3	595.48	8.50	5,061.58
2	**RED DE ALCANTARILLADO PARA LIXIVIADOS**				**1,919.820**
2.1	Replanteo y nivelación de ejes	m	14.00	0.80	11.20
2.2	Excavación mecánica en suelo sin clasificar 0-2 m	m3	14.30	6.00	85.80
2.3	Preparación de fondo de zanja (inlcuye material granular)	m2	8.40	3.65	30.66
2.4	Sum. Ins. Tubería PVC rígido pared estructurada e interior lisa Ø=220mm PVC Tipo B	m	14.00	28.00	392.00
2.5	Relleno compactado material de mejoramiento	m3	8.40	10.21	85.76
2.6	Cargado de material con minicargadora	m3	14.30	4.50	64.35
2.7	Transporte de material hasta 5km	m3	14.30	3.50	50.05
2.8	Pozo de h=2.0 a 4.0 m, incluye tapa y cerco HD	u	1.00	1,200.00	1,200.00
3	**EVACUACION DE GASES**				**9,990.000**
3.1	Sum. Y coloc. Lecho filtrante grava triturada d = 6-8"	m3	152.10	35.00	5,323.50
3.2	Malla galvanizada hexagonal corral 5/8	m2	459.00	6.50	2,983.50
3.3	Tiras de madera 5x5 cm	m	360.00	2.00	720.00
3.4	Tubería PVC 110mm desagüe	m	90.00	9.50	855.00
3.5	Codo PVC 110mm desagüe 90	u	9.00	12.00	108.00
4	**ZANJAS RELLENO**				**26,194.390**
4.1	Replanteo y nivelación ejes áreas	m	113.00	0.80	90.40
4.2	Excavación a máquina en suelo sin clasificar para conformación de plataformas	m3	1,859.71	5.50	10,228.42
4.3	Compactación de talud de zanjas	m2	7,805.48	1.20	9,366.58
4.4	Transporte de material hasta 5km	m3	1,859.71	3.50	6,508.99
5	**MATERIAL DE COBERTURA**				**314,764.160**
5.1	Replanteo y nivelación ejes áreas	m	560.00	0.80	448.00
5.2	Excavación a máquina en suelo sin clasificar para conformación de plataformas	m3	8,493.44	5.50	46,713.94
5.3	Excavación mecánica en suelo de consolidación Alta, 0-2m	m3	3,640.05	9.50	34,580.45
5.4	Relleno compactado con material de excavacion	m3	12,133.49	8.50	103,134.67
5.5	Transporte de material hasta 5km	m3	37,110.60	3.50	129,887.10
6	**DRENAJE**				**53,348.500**
6.1	Excavación drenes	m3	60.00	6.00	360.00
6.2	Sum. Y coloc. Lecho filtrante grava triturada d = 6-8"	m3	29.70	35.00	1,039.50
6.3	Suministro e instalación de material sintético para la cobertura (Geomembrana espesor 1mm)	m2	4,950.00	6.50	32,175.00
6.4	Geotextil para subdrenes del tipo NT 1600, con 4.20 m2/m	M2	4,950.00	3.20	15,840.00
6.5	Tubería de PVC Perforada y corrugada para subdrenes, D=200 MM, SUMINISTRO E INSTALACIÓN	m	97.00	22.00	2,134.00
6.6	Tubería de PVC Perforada y corrugada para subdrenes, D=160 MM, SUMINISTRO E INSTALACIÓN	m	100.00	18.00	1,800.00
PRESUPUESTO TOTAL					$423,945.45

ANEXO 9. ANÁLISIS MULTICRITERIO

Alternativas preliminares para emplazamiento del relleno sanitario. (Análisis Multicriterio).

El análisis multicriterio tiene la finalidad de sustentar técnicamente la toma de decisiones respecto a la gestión de residuos sólidos y la posible implementación de un relleno sanitario, para esto se usa el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, siglas en ingles), desarrollada por Thomas L. Saaty. Esta metodología permite designar una jerarquía entre los criterios y subcriterios, asignando ponderaciones en función de su importancia. (Ver Anexo 9)

Para realizar el análisis multicriterio se presentan varios datos geográficos, geofísicos y meteorológicos, cada uno de estos forman capas (shapefile) o ráster que clasifican toda la información de acuerdo con los criterios que se necesitan para realizar la selección del lugar idóneo para el emplazamiento de un nuevo relleno sanitario en el cantón Paute.

Una vez obtenidas las capas se colocan en el programa ArcMap versión 10.8, luego se realiza el corte de cada criterio y se estandarizan las capas, para luego realizar una combinación con el cual se obtenga un puntaje de idoneidad general.

Tabla 1. Explicación de los valores jerárquicos para el análisis multicriterio

Valores	Explicación
1	No es una opción viable para la decisión final
2	Es una mala opción para la decisión final
3	Es una buena opción para la decisión final.
4	Es una excelente opción para la decisión final.
5	Es la mejor opción posible para la decisión final.

Los criterios se evalúan y reclasifican según el libro VI, Anexo 6 del Acuerdo Ministerial 061 numeral 4.12.4 literal del a) al h), para la ubicación del relleno sanitario.

Tabla 2. Criterios y Rangos para el análisis multicriterio.

Criterio	Distancia mínima para emplazamiento de relleno sanitario
Cuerpos hídricos	Mínimo 200 m
Zonas urbanas/pobladas	Mínimo 5000 m
Áreas protegidas	Mínimo 500m
Pendientes	Máximo 20%
Vías	Mínimo 200 m

Luego de aplicar estos criterios de utiliza la herramienta Superposición ponderada (WO, Weighted Overlay), esto consiste en agregar las capas en secuencia para producir el ráster de salida con las áreas potenciales para considerar el área potencial para el establecimiento de un relleno sanitario.

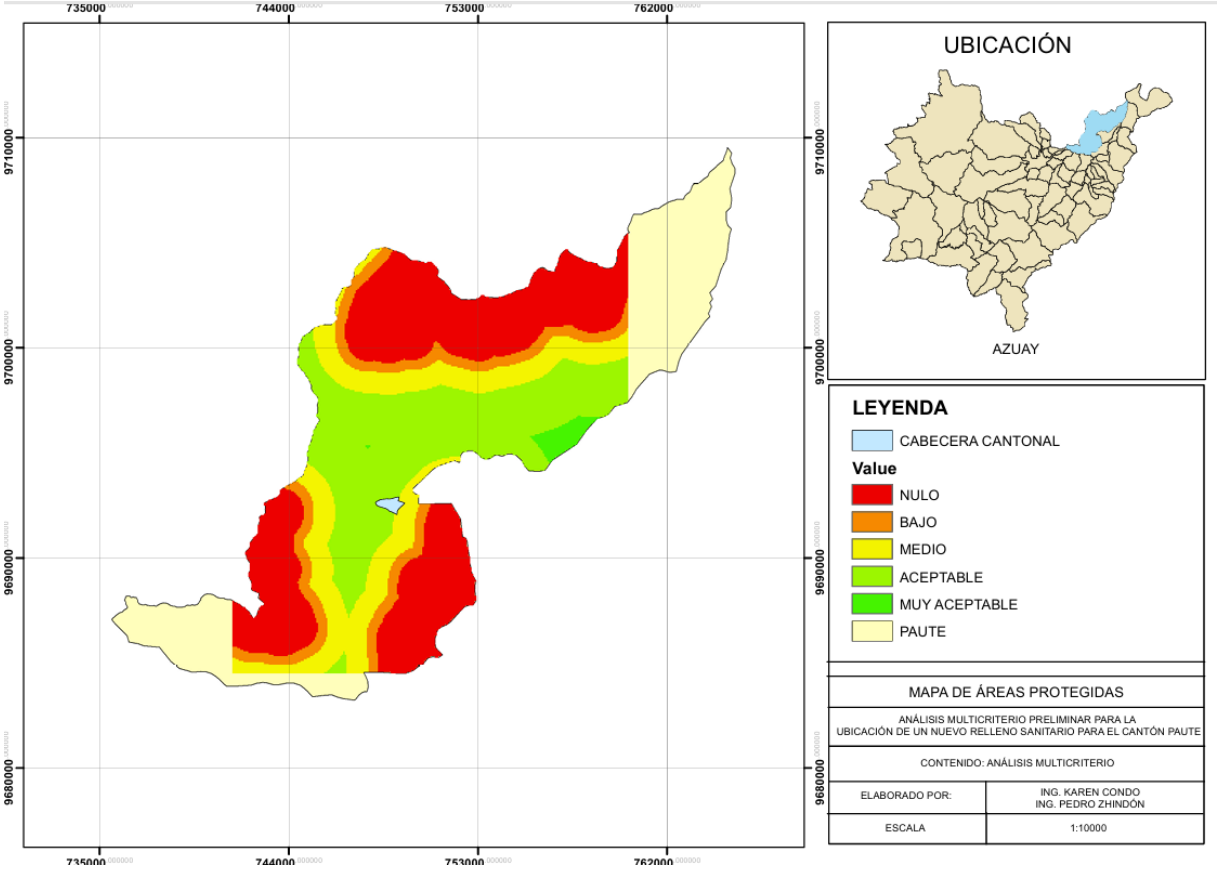
Áreas protegidas.

En el estudio se consideran áreas protegidas, de estas forman parte bosques protectores, se usa un rango de 0-500 m como distancia mínima, dado que es un criterio fundamental debido a su alta sensibilidad ambiental y las restricciones legales. La distancia mínima previene impactos negativos directos e indirectos sobre los ecosistemas protegidos.

Al no considerar estos rangos existen efectos adversos, tales como: contaminación de suelos y cuerpos de agua por lixiviados, afectación a la flora y fauna por emisiones de gases y material particulado.

Este criterio es como una restricción ambiental de tipo excluyente lo que implica su incumplimiento invalida la capacidad del sitio, independientemente del desempeño en otros criterios.

Ilustración 1. Mapa de áreas protegidas.



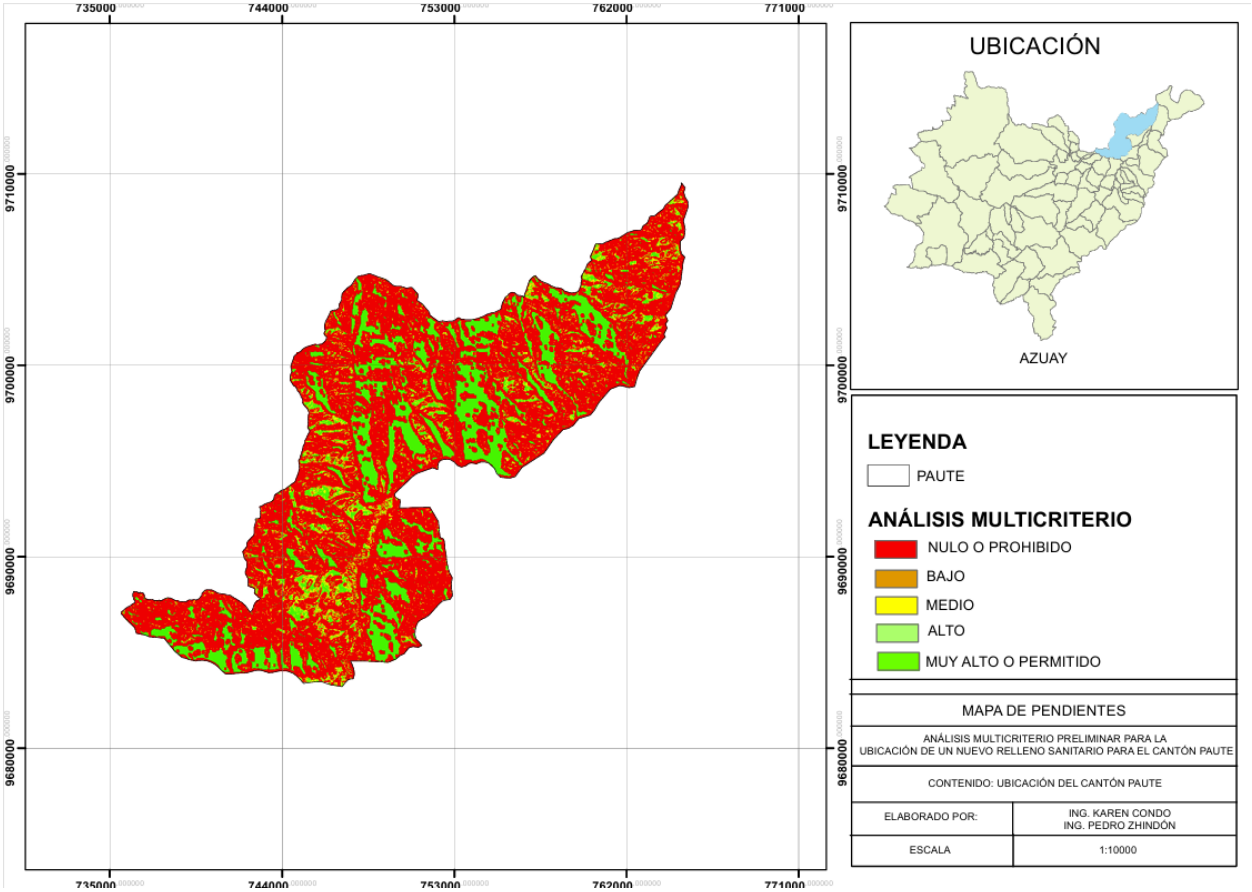
La inclusión de las áreas protegidas como criterio de exclusión dentro del análisis multicriterio refuerza la prevención y prioriza la conservación ambiental sobre otros factores. En este sentido, se puede asegurar que cualquier alternativa seleccionada para la disposición final de residuos sólidos no compromete ecosistemas en protección ni exista violación la normativa de protección ambiental.

Pendientes de terreno.

La pendiente del terreno se establece como uno de los criterios mas importantes para la selección del lugar de implantación del relleno sanitario. Dado que, influye directamente en la construcción, se busca obtener estabilidad en taludes, al ser el relleno sanitario implantado de acuerdo con la topografía de la zona es necesario contar con terreno que sea firme y estable, asegurando la operatividad de la maquinaria y personal que labora dentro de este.

El rango de pendientes utilizado para el análisis es del máximo del 22%, con esta condición se pueden identificar las zonas aptas para la implantación del relleno.

Ilustración 2. Mapa de pendientes



Fuentes hídricas.

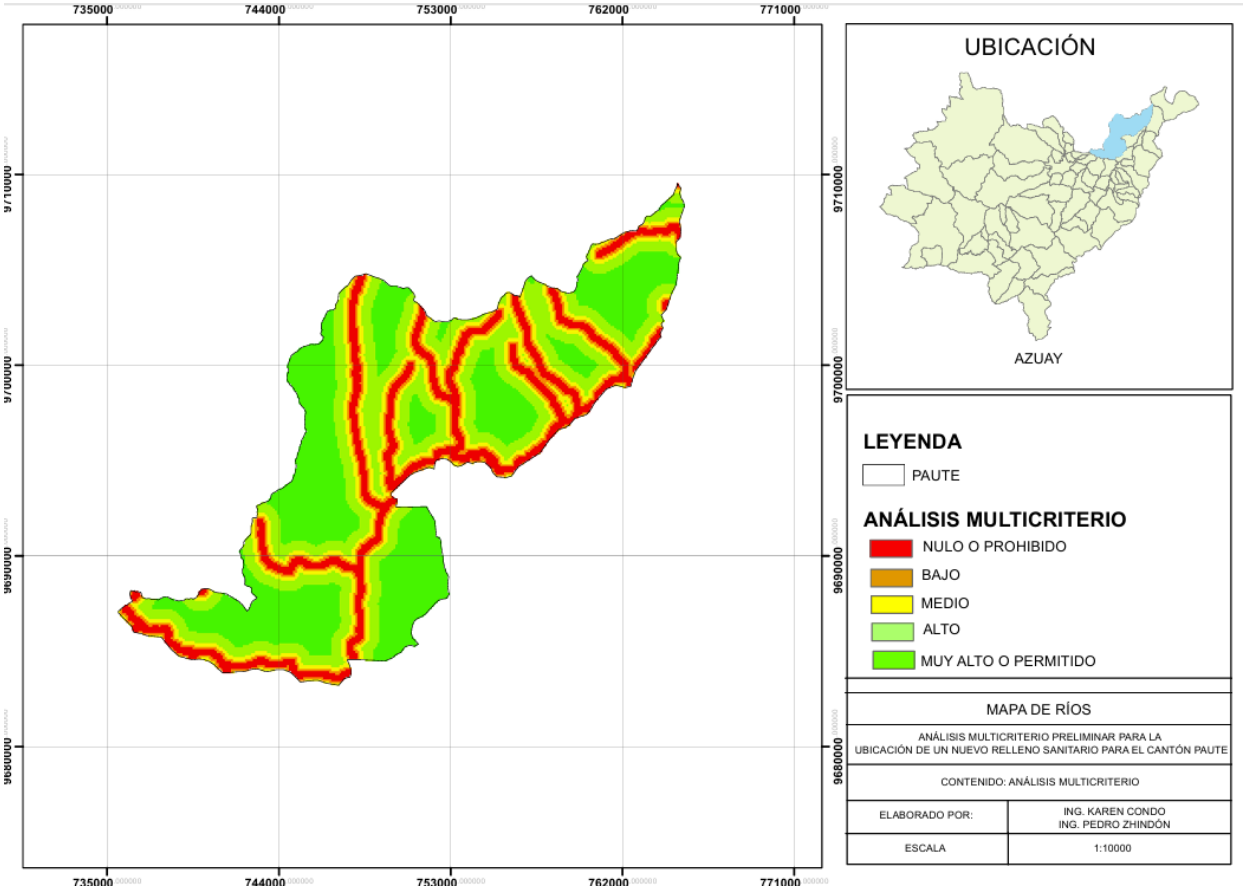
La proximidad a las fuentes hídricas es uno de los parámetros más sensibles del análisis, dado que la colocación de un relleno sanitario cercano a estas significa un alto nivel contaminante por la misma generación de lixiviados, infiltrándose en el suelo o escurriéndose superficialmente, afectando la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

El rango establecido como zona no apta para el emplazamiento del relleno sanitario es de 0 a 200 metros, siendo esta la distancia mínima en la que se puede establecer la franja de protección, toda área que se ubique dentro de ésta se considera como no viable o nula.

Este criterio es de carácter ambiental y por eso existe una restricción que lo excluye, ya que, la protección de los recursos hídricos es prioritaria frente a otros factores.

Al establecer esta zona se reduce significativamente el riesgo de impactos ambientales negativos sobre los recursos hídricos, haciendo al proyecto sostenible y viable.

Ilustración 3. Mapa de ríos



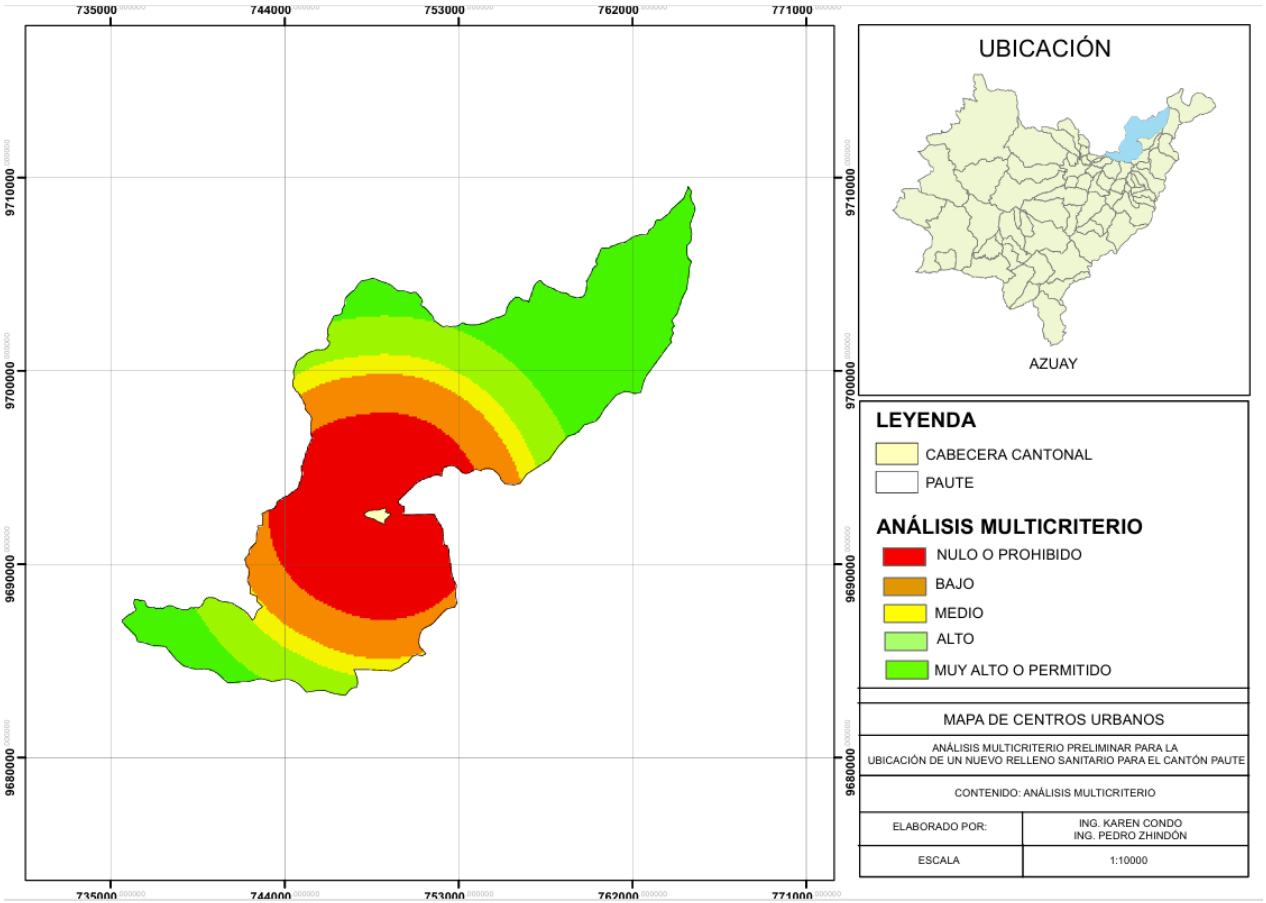
Centros urbanos.

La distancia a centros urbanos es determinante en el análisis multicriterio, dado que existe una relación directa con la exposición de la población a impactos ambientales y sanitarios, esto incluye, vectores, tráfico pesado, emisión de olores, dispersión de material particulado y depreciación del entorno inmediato. Por esto, este criterio se orienta a disminuir conflictos socioambientales y garantizar condiciones adecuadas de salud pública.

Se establece una distancia mínima de 5 km, considerando como no aptas las áreas ubicadas dentro de este radio, esto ayuda a minimizar la percepción de olores, exposición a contaminantes atmosféricos, además de prevenir conflictos a gran escala.

Esto ayuda a proporcionar un margen de seguridad suficiente frente a impactos directos e indirectos ocasionados por la implantación del relleno sanitario.

Ilustración 4. Mapa de centros urbanos



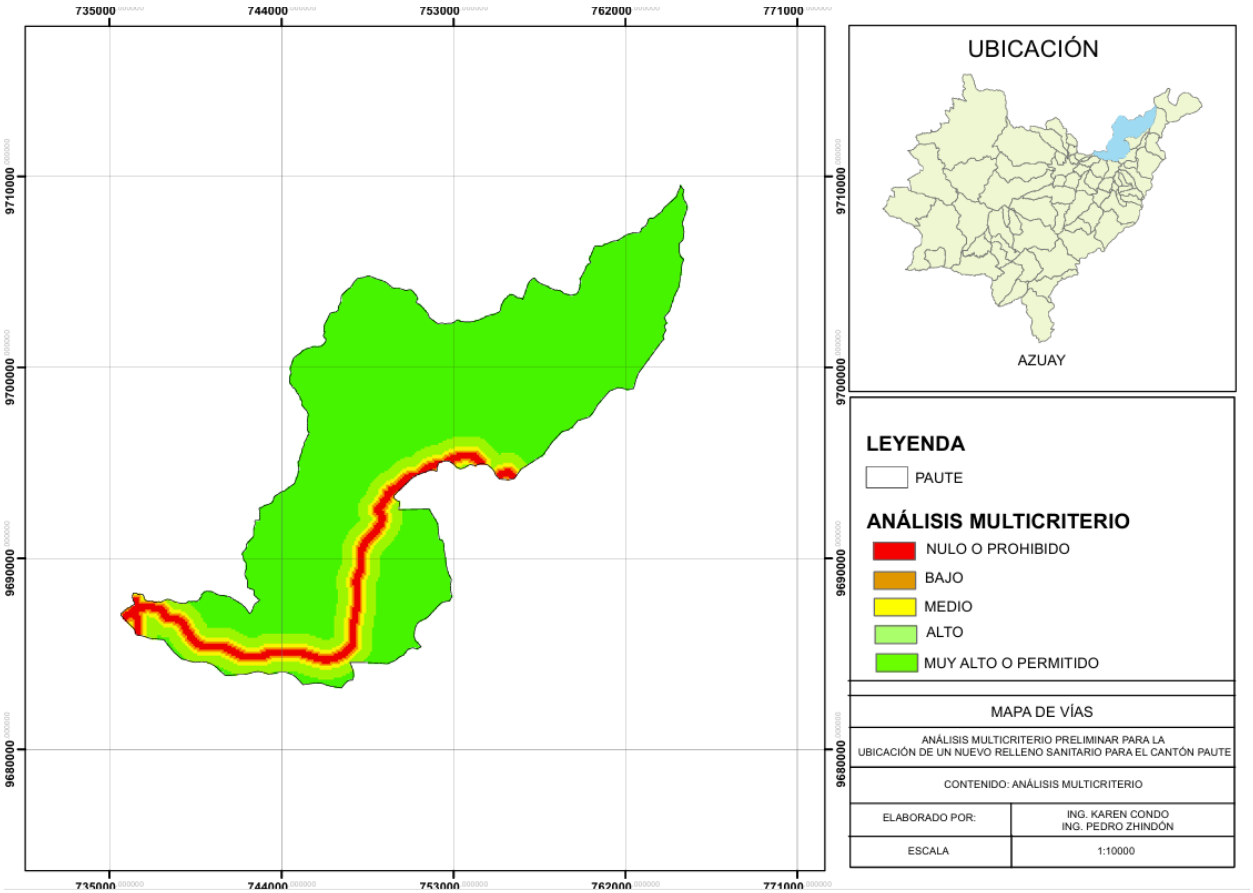
Vías.

La proximidad a vías de acceso incide tanto en la funcionalidad del sistema como en la mitigación de impactos hacia el entorno. Brindar fácil acceso permite optimizar las rutas de recolección, reduciendo costos de transporte, hay que tomar en cuenta que esta accesibilidad puede generar efectos adversos al tener una cercanía excesiva, como la dispersión de residuos, generación de polvo, alto tráfico o interferencias en el tránsito y se ve perjudicada la seguridad vial.

En este análisis la distancia mínima de 200 m respecto a vías de acceso, son consideradas no aptas y las que se encuentran en distancias mayores son consideradas aptas, esto busca obtener un equilibrio entre la accesibilidad de operación y controla impactos, manteniendo la proximidad funcional que no incremente costos.

Al establecer esta distancia mínima se solventa la necesidad de conformar la accesibilidad del relleno sanitario y la reducción de impactos asociados a su operación.

Ilustración 5. Mapa de vías



Resultados

La superposición de las capas correspondientes a áreas protegidas, fuentes hídricas, pendientes, centros urbanos y vías, admiten obtener un modelo espacial integrado de aptitud territorial para el emplazamiento del relleno sanitario. Este proceso realizado con herramientas SIG, sintetiza todo el análisis en un mapa final que reúne las restricciones y condiciones evaluadas.

El mapa de aptitud o ponderado incorpora diferentes ponderaciones en el cual cada celda tiene un valor que representa un nivel de idoneidad, en el cual las zonas viables se clasifican como aptas y representan a los sectores que cumplen con las condiciones mínimas, ambientales, sociales y técnicas que debe tener un relleno sanitario.

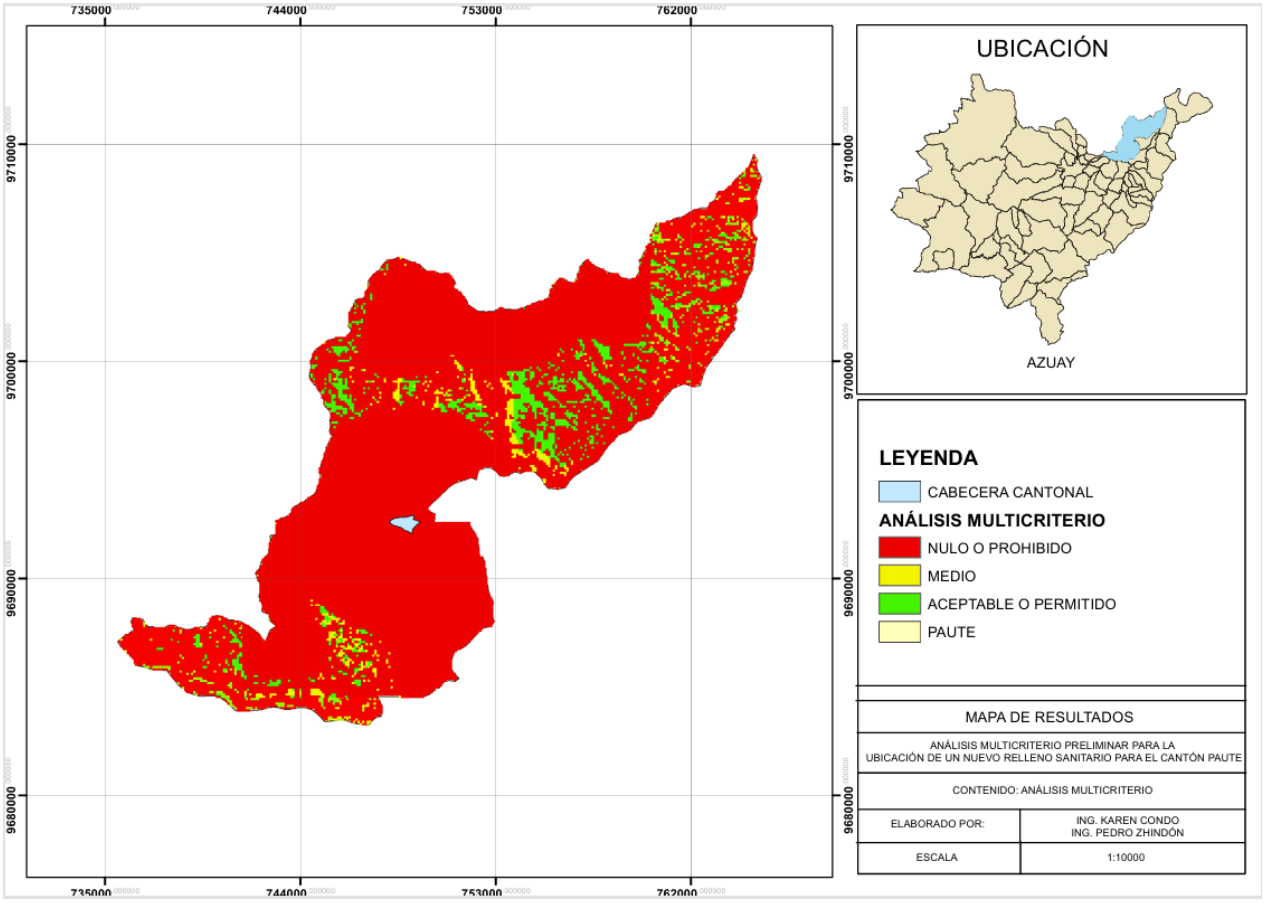
Hay que considerar que la Municipalidad de Paute no cuenta con predios destinados para emplazamiento de rellenos sanitarios, por lo que a través de este análisis multicriterio se busca tener una herramienta de identificación apropiada para la elección de un área adecuada para el emplazamiento del nuevo relleno sanitario de Paute.

Las parroquias que presentan la mayor cantidad de opciones viables para el emplazamiento del nuevo relleno sanitario serian:

- Guarainag
- Tomebamba
- Dugdug
- Bulán
- Parte de paute
- El Cabo
- San Cristobal.

En la siguiente imagen se ilustra de color rojo cuales son las zonas prohibidas o no recomendables para realizar el emplazamiento del relleno sanitario, las amarillas indican ser puntos medios y medianamente recomendados para situarlo, las zonas verdes representan el área en donde es muy aceptable y permitido el emplazamiento.

Ilustración 6. Mapa de resultados.



Evaluación de puntos aptos.

Debido a que la superposición ponderada en ArcGIS analiza cada celda del territorio como un punto, el que un punto sea clasificado como apto no asegura que el sitio sea viable para un relleno sanitario. Por lo que, se seleccionaron dos puntos que se encuentran dentro de las zonas aptas (color verde de la Ilustración 6) y se evaluaron dos condiciones que no se consideran en el modelo, que son la superficie apta continua alrededor del punto y la

accesibilidad desde la vía principal. Para la superficie mínima se tomó como referencia el área del predio actual (7 ha), ya que en esta se incluye el área de disposición y las obras complementarias. La ubicación de los puntos se puede observar en la Ilustración 7.

Sitio A.

El sitio A se ubica en las coordenadas aproximadas 745 510 E y 9 684 640 N (UTM WGS84, zona 17S), a unos 8.6 km al sur de la cabecera cantonal y a 3.7 km del relleno sanitario actual. Este punto cumple con los cinco criterios del análisis, ya que tiene una pendiente menor o igual al 20%, está a más de 200 m de los cuerpos hídricos, a más de 5 km de la cabecera cantonal, fuera de las áreas protegidas y de su franja de 500 m, y a más de 200 m de la vía principal, de la cual lo separan unos 350 m, por lo que tiene una buena accesibilidad.

Sin embargo, la zona apta en donde se encuentra el punto tiene una superficie aproximada de 5.3 ha, con una forma alargada de unos 200 m de ancho y rodeada de terrenos con pendientes mayores al 20%. Esta superficie es menor a las 7 ha del predio actual, por lo que no alcanzaría para ubicar el área de disposición junto con las vías internas, el tratamiento de lixiviados, el banco de material de cobertura y la franja de aislamiento, por esta razón el sitio no se considera viable por superficie insuficiente.

Sitio B.

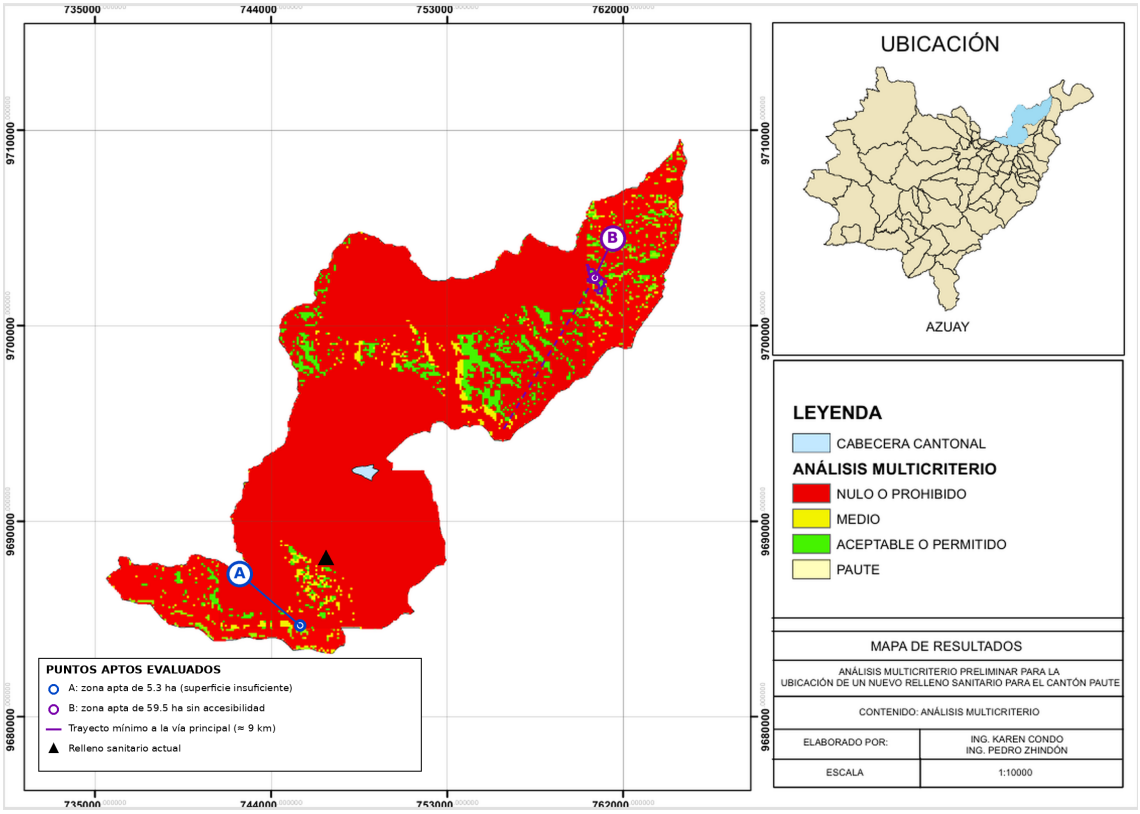
El sitio B se ubica en las coordenadas aproximadas 760 560 E y 9 702 420 N (UTM WGS84, zona 17S), a unos 15.3 km al noreste de la cabecera cantonal. Este punto también cumple con los cinco criterios del análisis y la zona apta en donde se encuentra tiene una superficie aproximada de 59.5 ha, la cual sería suficiente para un relleno sanitario y sus obras complementarias.

No obstante, el punto se encuentra a unos 9 km en línea recta de la vía principal que se consideró en el análisis, y el trayecto más corto hacia esta atraviesa en un 71 % terrenos con pendientes mayores al 20% y cruza varias franjas de protección de cauces. Esto quiere decir que se tendría que construir una vía de acceso larga y costosa por zonas restringidas para el paso diario de los recolectores, además de que la distancia de transporte desde la cabecera sería mayor a 15 km, es decir tres veces más que la del relleno actual. Por la falta de accesibilidad el sitio no se considera viable.

Tabla 3. Evaluación de los puntos aptos seleccionados.

Criterio	Requisito	Sitio A	Sitio B
Áreas protegidas	Mínimo 500 m	Cumple	Cumple
Cuerpos hídricos	Mínimo 200 m	Cumple	Cumple
Pendientes	Máximo 20%	Cumple	Cumple
Zonas urbanas/pobladas	Mínimo 5000 m	8.6 km – Cumple	15.3 km – Cumple
Vías	Mínimo 200 m	≈ 350 m – Cumple	≈ 9 km – Cumple
Resultado del modelo	—	Apto	Apto
Superficie apta continua	Mínimo 7 ha	**5.3 ha – No cumple**	59.5 ha – Cumple
Accesibilidad	Acceso desde la vía principal sin cruzar zonas restringidas	Cumple	**≈ 9 km, 71 % con pendiente > 20% – No cumple**
Resultado preliminar	—	No viable	No viable

Ilustración 7. Puntos aptos evaluados.



Tras haber realizado el análisis multicriterio se puede evidenciar que existe poca disponibilidad para establecer un nuevo sitio de disposición final de residuos, debido a que las zonas verdes son escasas y pequeñas, también están muy dispersas e individuales, por lo que se puede establecer que es altamente improbable que uno de estos puntos cumpla con los requisitos mínimos de tamaño, accesibilidad logística para la construcción y operación viable de un “relleno sanitario moderno”.

La evaluación de los puntos aptos ayuda a confirmar lo anterior, ya que los dos puntos seleccionados dentro de las zonas verdes cumplen con los cinco criterios del modelo, pero no se consideran viables por condiciones que el análisis por celdas no toma en cuenta. El sitio A, que se encuentra junto a la vía principal en el sector sur, tiene una zona apta continua de apenas 5.3 ha, y el sitio B, ubicado en el sector nororiental, no cuenta con un acceso viable desde la vía principal, que se encuentra a unos 9 km a través de terrenos con pendientes mayores al 20%.

Con esto se puede ver que las zonas aptas del cantón que están cerca de la vía principal son pequeñas y fragmentadas, mientras que las que tienen una superficie suficiente se encuentran en sectores alejados y sin acceso. Sin embargo, estos resultados son preliminares, por lo que para tener seguridad de emplazar un relleno sanitario en alguno de estos sitios se requiere realizar más estudios, como topografía de detalle, estudios geotécnicos e hidrogeológicos, uso del suelo y tenencia de los predios, y el diseño de una vía de acceso, ya que existe la posibilidad de que con estos estudios alguna de estas zonas resulte apta para su implantación.

El análisis multicriterio preliminar muestra que el Cantón Paute no posee áreas viables en su territorio para la ubicación de un nuevo relleno sanitario. Intentar encontrar un sitio a través de procesos de contratación pública sería una inversión de recursos poco viable, ya que las restricciones territoriales son casi totales. Por esto, tras haber realizado un análisis preliminar se sugiere descartar la búsqueda dentro del cantón y explorar alternativas de alargar la vida útil del relleno existente, soluciones mancomunadas o disposición final en otros rellenos del cantón.