

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Título del trabajo

Evaluación geotécnica de residuos mineros en la relavera comunitaria El Tablón,
provincia de El Oro.

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Adrian Patricio Alvarez Reyes

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza de mantener una fe inmensa y acompañarme en cada paso que doy, sin miedo al éxito. De igual manera, se lo dedico a mi familia, quienes siempre me han apoyado en mis estudios y me han brindado la enseñanza de ser una persona correcta, con valores de honradez y responsabilidad. Gracias por estar presentes en mi vida y por motivarme constantemente a crecer tanto en lo profesional como en lo personal, en especial a mi madre, a quien, con este logro, le hago cumplir uno de sus sueños: verme convertido en ingeniero.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a la coordinadora de la carrera de Minas, ya que, de no haberla conocido, muchas oportunidades, enseñanzas, experiencias y su constante guía, que hoy me convierten en un profesional, se habrían quedado en el camino. Gracias por su compromiso con la formación de los estudiantes y por seguir impulsando y difundiendo la carrera de Minas.

Finalmente, agradezco a todos mis compañeros que he conocido a lo largo de mi vida universitaria, por su amistad, apoyo y compañerismo, tanto de la carrera de Minas, como de Civil y de otras facultades, me dieron fuerza para realizar el proyecto

Declaración Expresa

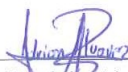
Yo Adrian Patricio Alvarez Reyes acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 08 de octubre del 2025.



Adrian Patricio Alvarez Reyes

Evaluadores

Ph.D. Samantha Jiménez Oyola

Profesor de Materia

Ph.D. Silvia Loaiza Ambuludi

Tutor de proyecto

Resumen

La disposición de relaves sin compactación ni control hidráulico constituye uno de los principales factores de riesgo geotécnico de la relavera en fase operativa, al presentar condiciones de saturación, incremento de presión de poro y licuefacción estática. El proyecto evaluó la estabilidad de las plataformas de depósito de la Relavera Comunitaria El Tablón, ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro, considerando escenarios drenados y no drenados en la operación actual del depósito. Con el propósito, se realizó el levantamiento geométrico con dron para definir la geometría real de las plataformas, así como campañas de muestreo superficial de relaves con la obtención de muestras representativas. En laboratorio se realizaron ensayos de caracterización física y mecánica conforme a normas ASTM e ISO, obteniendo parámetros geotécnicos. Los parámetros y geometría obtenidos fueron integrados en modelos geotécnicos y analizados mediante métodos de equilibrio límite utilizando el software Slide 2. Los resultados evidenciaron que las plataformas de relaves están constituidas principalmente por limos y arcillas de baja plasticidad, con factores de seguridad de 1.42 en condición drenada y 0.34 en condición no drenadas. Se concluye que las plataformas presentan condiciones de inestabilidad y requieren medidas técnicas para incrementar su seguridad geotécnica.

Palabras Claves: Relaves, Presión de poro, Equilibrio límite, Condición drenada

Abstract

The placement of mine tailings without compaction or hydraulic control constitutes one of the main geotechnical risk factors in tailings facilities during the operational phase, as it promotes conditions of saturation, increased pore water pressure, and static liquefaction. This project evaluated the stability of the deposition platforms of the El Tablón Community Tailings Facility, located in the canton of Portovelo, El Oro Province, considering both drained and undrained scenarios under the current operating conditions of the deposit. For this purpose, geometric surveys were carried out using drone-based photogrammetry to define the actual geometry of the platforms, together with surface tailings sampling campaigns to obtain representative samples. Laboratory tests for physical and mechanical characterization were conducted in accordance with ASTM and ISO standards, allowing the determination of geotechnical parameters. The obtained parameters and platform geometry were integrated into geotechnical models and analyzed using limit equilibrium methods with the Slide2 software. The results showed that the tailings platforms are mainly composed of silts and low-plasticity clays, with factors of safety of 1.42 under drained conditions and 0.34 under undrained conditions. It is concluded that the evaluated platforms exhibit unstable conditions and require technical measures to improve their geotechnical safety.

Keywords: Tailings, Pore water pressure, Static liquefaction, Limit equilibrium, Drained condition.

Índice General

<i>Resumen</i>	<i>I</i>
<i>Abstract</i>	<i>II</i>
<i>Abreviaturas</i>	<i>VI</i>
<i>Simbología</i>	<i>VII</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>VIII</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>IX</i>
<i>Capítulo 1</i>	<i>1</i>
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción del Problema	2
1.3. Justificación del Problema	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5. Marco teórico	5
1.5.1. <i>Talud</i>	5
1.5.2. <i>Relaves mineros</i>	5
1.5.3. <i>Relaveras</i>	5
1.5.3.1. Método aguas arriba	5
1.5.3.2. Método aguas abajo.....	6
1.5.3.3. Método línea central.....	6
1.5.4. <i>Marco normativo y regulatorio</i>	7
1.5.5. <i>Casos Relevantes de fallas de relaveras y su importancia para el contexto ecuatoriano</i>	8
1.5.6. <i>Caracterización geotécnica de relaves</i>	9
1.5.6.1. Humedad.	9
1.5.6.2. Densidad.....	9
1.5.6.3. Permeabilidad.....	9
1.5.6.4. Gravedad específica del relave.....	9
1.5.6.5. Análisis granulométrico	9

1.5.6.6.	Resistencia al corte.....	10
1.5.6.7.	Cohesión.....	10
1.5.6.8.	Ángulos de fricción.....	10
1.5.6.9.	Límites de consistencia o Atterberg.....	10
1.5.7.	<i>Modelamiento geométrico de relaveras.</i>	12
1.5.8.	<i>Análisis de estabilidad de relaveras</i>	12
<i>Capítulo 2</i>		<i>14</i>
2.1.	Metodología.....	15
2.2.	Área de estudio.....	16
2.3.	Campaña de campo.....	17
2.3.1.	<i>Campaña de muestreo:</i>	17
2.3.2.	<i>Campaña de levantamiento topográfico</i>	19
2.4.	Análisis de laboratorio.....	20
2.4.1.	<i>Caracterización física</i>	20
2.4.1.1.	Humedad Natural.....	20
2.4.1.2.	Lavado de la muestra sobre un tamiz.....	21
2.4.1.3.	Análisis Granulométrico.....	22
2.4.1.4.	Ensayo de gravedad específica.....	24
2.4.1.5.	Límites de consistencia.....	25
2.4.1.6.	Límite Líquido.....	26
2.4.1.7.	Límite Plástico.....	26
2.4.1.8.	Índice de plasticidad.....	27
2.4.2.	<i>Caracterización mecánica</i>	27
2.4.2.1.	Ensayo de corte directo.....	28
2.5.	Procesamiento y análisis digital.....	29
2.5.1.	Modelamiento geométrico y calculo volumétrico mediante fotogrametría.....	30
2.5.2.	Modelamiento geotécnico en Slide2.....	30
2.5.2.1.	Condiciones secas.....	30
2.5.2.2.	Condiciones saturadas.....	31
<i>Capítulo 3</i>		<i>32</i>
3.	Resultados y análisis.....	33

3.1.	Caracterización física	33
3.1.1.	Humedad natural	33
3.1.2.	Gravedad específica	33
3.1.3.	Peso específico aparente del relave	34
3.1.4.	Análisis Granulométrica.....	34
3.1.5.	Límites de consistencia y plasticidad	36
3.1.6.	Clasificación SUCS.....	38
3.1.7.	Selección de muestras representativas y evaluación del riesgo geotécnico por tipo de suelo para cada plataforma	39
3.2.	Caracterización mecánica.....	40
3.2.1.	Ensayo de Corte Directo	41
3.3.	Modelamiento geométrico de las plataformas de depósito	44
3.3.1.	Modelo Fotogramétrico.....	45
3.3.2.	Cálculo volumétrico de las plataformas	47
3.4.	Análisis de estabilidad de las plataformas.....	47
3.4.1.	Condición seca y drenado	49
3.4.2.	Condición Saturada	49
<i>Capítulo 4.....</i>		<i>51</i>
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	52
4.1.	Conclusiones	52
4.2.	Recomendaciones.....	53
<i>Referencias</i>		<i>55</i>

Abreviaturas

ANCOLD	Australian National Committee on Large Dams
ARCERNNR	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables
ASTM	American Society for Testing and Materials
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
ISO	Organismo Internacional de Estandarización
MDE	Modelo Digital de Elevación
MEM	Ministerio de Energía y Minas
ODS	Objetivo de desarrollo sostenible
RCET	Relavera comunitaria El Tablón
RTK	Real Time Kinematic
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 1984

Simbología

ϕ'	Ángulo de fricción interna efectivo
c'	Cohesión efectiva del suelo
Ha	Hectareas
L	Litro
m	Metro
mg	Miligramo
mL	Mililitro
mm ²	Milímetro al cuadrado
N	Newton
kN/m ³	Kilonewton por metro cúbico
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
Pa	Pascal
kPa	Kilo Pascal
γ	Peso específico del suelo

Índice de figuras

Figura 1 Métodos Constructivos de Tranques de Relaves.	6
Figura 2 Carta Plasticidad, Clasificación Unificada (SUCS).....	11
Figura 3 Diagrama de la metodología	15
Figura 4 Mapa de ubicación/acceso la Relavera Comunitaria El Tablón.....	16
Figura 5 Imagen Satelital de la Relavera Comunitaria El Tablón de la ubicación de las muestras	17
Figura 6 Recolección de muestra y Levantamiento topográfico con dron	20
Figura 7 Proceso para realizar el lavado y granulometría mecanizada	23
Figura 8 Proceso para realizar la ejecución del ensayo de granulometría fina.....	24
Figura 9 Proceso para realizar la ejecución del ensayo de gravedad específica.....	25
Figura 10 Proceso para realizar la ejecución del ensayo de límite líquido y limite plástico.	27
Figura 11 Proceso para realizar la ejecución del ensayo de corte directo	29
Figura 12 Curva Granulométricas de las muestras de relaves por plataforma	35
Figura 13 Curva granulométrica de las muestras de cada plataforma que tiene mayor porcentaje de fino.36	
Figura 14 Carta de Plasticidad de Casa Grande (Límite Líquido vs Índice Plasticidad)	37
Figura 15 Consolidación log t de la muestra ADR-1	41
Figura 16 Consolidación log t de la muestra ADR-4	42
Figura 17 Envolvente de Mohr Coulomb en la muestra ADR-1, correspondiente a la plataforma 1.....	42
Figura 18 Envolvente de Mohr Coulomb en la muestra ADR-4, correspondiente a la plataforma 2.....	43
Figura 19 Perfil de la plataforma de la muestra ADR-1.....	44
Figura 20 Perfil de la plataforma de la muestra ADR-4.....	45
Figura 21 Ortofoto de la Relavera Comunitaria El Tablón	46
Figura 22 Modelado 3D, de las plataformas 1 y 2 de las muestras ADR-1 y ADR-4.....	46
Figura 23 Determinación del volumen de las plataformas 1 y 2 a partir del levantamiento por dron (m ³).47	
Figura 24 Modelo de superficie en Slide 2, de la plataforma 1, muestra ADR-1	48
Figura 25 Modelo de superficie en Slide 2, de la plataforma 2, muestra ADR-4	48
Figura 26 Modelado de la estabilidad para la plataforma 1 de la muestra ADR-1, en condiciones secas drenadas.....	49
Figura 27 Modelado de la estabilidad para la plataforma 1 de la muestra ADR-1, en condiciones saturadas drenadas.....	50
Figura 28 Modelado de la estabilidad para la plataforma 2 la muestra ADR-4, en condiciones no drenadas	50

Índice de tablas

Tabla 1 Casos representativos de fallas o evaluaciones críticas de relaveras.....	8
Tabla 2 Coordenadas de las muestras.....	18
Tabla 3 Propiedades físicas y masa-volumen del relave	34
Tabla 4 Clasificación de los relaves	39
Tabla 5 Potencial de inestabilidad por tipo de suelo	40
Tabla 6 Resultados de los ensayos de corte directo ADR-1 y ADR-4	43

CAPÍTULO 1

1.1. Introducción

La minería enfrenta el desafío de gestionar sus residuos de manera segura y sostenible, siendo la implementación de relaveras una solución técnica de largo plazo que permite centralizar el depósito de relaves, optimizar costos y aplicar estándares de diseño más rigurosos (Vivoda, 2025). Una relavera funciona como una estructura destinada al almacenamiento del material no valorizado generado tras el proceso de beneficio del mineral, cuya estabilidad a largo plazo resulta fundamental para la sostenibilidad del proyecto minero (Blight, 2010). Desde el punto de vista geotécnico, la mayoría de los relaves se clasifican como limos o arenas limosas y arcillas, lo que representa un desafío para su diseño y evaluación de estabilidad, dado que gran parte de los criterios de ingeniería disponibles han sido desarrollados principalmente a partir de ensayos en arenas y arcillas naturales (Arnold, 2025).

En Ecuador, la actividad minera se concentra principalmente en la región sur, específicamente en las provincias de El Oro, Loja, Azuay y Zamora Chinchipe. Un caso particular es el cantón Portovelo, en la provincia de El Oro, donde, de acuerdo con datos del Boletín Institucional del Sector Minero (Ministerio de Energía y Minas, 2021), se registran 48 derechos mineros y 80 plantas mineralúrgicas. En esta zona, el principal mineral de interés es el oro, seguido de la plata. En la actualidad, Portovelo se ha consolidado como el epicentro nacional del procesamiento de oro en Ecuador (Hunter, 2025).

La concentración histórica de plantas de beneficio en Portovelo generó, durante años, un manejo disperso e incontrolado de los residuos mineros, los cuales eran descargados directamente en los ríos Calera y Amarillo, afluentes del Puyango. Evidenciaba la ausencia de un sistema centralizado para la disposición de relaves. Para atender esta problemática, en el año 2012 se diseñó la Relavera Comunitaria El Tablón (RCET), concebida como una infraestructura común destinada a recibir y almacenar los residuos generados por las plantas de beneficio, evitando así su vertido a los cuerpos hídricos de la zona (Ministerio del Ambiente, 2012).

La acumulación de residuos mineros a lo largo de los años ha generado una creciente demanda de seguridad para la industria y las comunidades aledañas. Esta preocupación ha impulsado que el diseño y la gestión de las presas de relaves evolucionen, con el objetivo central de mitigar los riesgos asociados (Morrill, 2025). En este contexto, la evaluación de la estabilidad estructural durante la fase operativa y de expansión se consolida como una etapa crucial para garantizar la sostenibilidad y seguridad del proyecto. Es precisamente en esta problemática donde el presente estudio encuentra su relevancia, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. La investigación contribuye al ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura resilientes) mediante el uso de herramientas tecnológicas para el análisis de estabilidad; al ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) al buscar prevenir riesgos para los trabajadores; y al ODS 12 (Producción Responsable) al promover la gestión segura de los recursos minerales y residuos mineros. Basándose en lo expuesto, este estudio busca caracterizar física y mecánicamente los relaves mineros de cara al análisis de estabilidad de las plataformas de depósito en la relavera.

1.2. Descripción del Problema

La RCET, ubicada en Portovelo, opera bajo un método inadecuado de disposición de residuos mineros, en el cual los camiones vierten los relaves formando plataformas sueltas, sin compactación controlada ni sistemas de drenaje. Esta práctica favorece la acumulación progresiva de material con una estructura altamente heterogénea y un comportamiento metaestable (Benjamin y Ward, 2005). La falta de estudios del tipo de material que se trabaja se traduce en desconocimiento de las características físicas y mecánicas del relave, lo que se observa en campo es una infiltración lenta del agua de lluvia y la acumulación de humedad en los estratos superiores e intermedios del depósito (Wickland et al., 2006). Como consecuencia de este proceso, se genera una plataforma compuesta por material parcialmente saturado en superficie y zonas progresivamente saturadas en profundidad, condición que reduce los esfuerzos efectivos y debilita

la estructura interna del depósito. En este contexto, los relaves inicialmente no saturados pueden experimentar un colapso estructural al entrar en contacto con el agua, generando una pérdida repentina de resistencia al corte (Fourie et al., 2001).

La operación continua, donde se incrementa progresivamente el área de superficie de las plataformas al igual que la altura del depósito se asocia a un nivel de riesgo no calculado, lo que hace imprescindible una caracterización geotécnica detallada que permita determinar los parámetros reales de resistencia del relave no compactado y evaluar la estabilidad de la plataforma frente a escenarios con condiciones secas y de saturación progresiva, con el fin de prevenir fallas súbitas del depósito y eliminar el riesgo de peligro a los trabajadores y maquinarias de la RCET en un periodo de corto a largo plazo.

1.3. Justificación del Problema

Desde el año 2012 la RCET, se encuentra activa con un depósito diario de tres mil toneladas de relaves, cuantificando aproximadamente 150 camiones mineros al día (Prefectura de El Oro, 2024) & (Bravo, 2023) . En el año 2022, se elevó la cota de las plataformas de almacenamiento del relave (Prefectura de El Oro, 2022). Sin embargo, como señala Blight (2010) la elevación de la cota en las relaveras constituye una modificación significativa de su geometría, lo que incrementa directamente las fuerzas impulsoras y las tensiones de corte. Debido a ello, para una buena gestión de los residuos mineros es necesario un estudio actualizado del comportamiento mecánico, al menos, cada 1 años y cada vez que exista un cambio importante para garantizar la estabilidad de las relaveras (Global Tailings Review, 2020).

Por lo tanto, la finalidad del proyecto es la evaluación geotécnica de los residuos mineros en la RCET en su estado actual de operación, mediante un estudio geotécnico de las plataformas de depósito que incluya: levantamiento geométrico y volumétrico, caracterización físico-mecánica de los relaves, análisis de estabilidad de los taludes de plataformas en distintos escenarios.

La investigación proporcionará una base de datos y parámetros geotécnicos representando por optimización de ensayos de laboratorio, una evaluación de la estabilidad de las plataformas de depósito de relaves, que incide directamente en la continuidad del almacenamiento de los residuos mineros y por ende en la continuidad laboral de las personas en las plantas de tratamiento mineral, así como, la estimación del volumen de residuos mineros susceptibles a la rotura. Los resultados no solo servirán para complementar y actualizar la información de estudios previos, sino que fundamentalmente brindarán recomendaciones técnicas para una gestión responsable que garantice la estabilidad global de las plataformas de avance y la relavera.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la condición geotécnica de las plataformas de depósito de relaves, mediante la caracterización física y mecánica de los residuos mineros y la aplicación de métodos de equilibrio límite, para la identificación de zonas críticas asociadas a posibles inestabilidades por disposición inadecuada de relaves.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros geométricos de las plataformas de depósito de relaves, mediante técnicas topográficas, para la obtención del modelo tridimensional necesario en el análisis de estabilidad.
- Caracterizar física y mecánicamente los relaves mineros mediante ensayos de laboratorio para la determinación de su clasificación y comportamiento geotécnico.
- Calcular el factor de seguridad de las plataformas de depósito de relaves, mediante la aplicación de métodos de equilibrio límite y herramientas tecnológicas para la evaluación actual de la estabilidad.

1.5. Marco teórico

1.5.1. Talud

Como establece Das (2015), "un talud es un terreno cuya superficie forma un ángulo con la horizontal". Si el talud se formó naturalmente, sin que exista la intervención del hombre, se denomina ladera. Si el talud es realizado por el hombre se denominan cortes o talud artificial, los cuales pueden ser formados con materiales de construcción o naturales (Das, 2015).

1.5.2. Relaves mineros

La minería metálica, desarrolla una serie de procesos para la transformación y aprovechamiento de los recursos minerales. El proceso de beneficio de minerales genera productos de bajo interés económico y residuos denominados relaves o colas, materiales de granulometría fina obtenidos tras la molienda y procesos metalúrgicos (Lobos y Chamorro, 2008). Su composición, determinada por la naturaleza del yacimiento, incluye principalmente componentes estériles o ganga, agua y partículas de roca, relegando el elemento de interés económico a un pequeño porcentaje. La disposición final de este residuo exige cumplir con estrictos protocolos de seguridad y responsabilidad ambiental (Beltran et al., 2018), deben permanecer estables y no ser fuentes de contaminación (Poling et al., 2002).

1.5.3. Relaveras

Depósito de relaves o relavera se define como la obra que permite almacenar los relaves provenientes de la fase de beneficio de toda actividad minera, contenidos en una obra estructurada en forma segura y de carácter permanente (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2020).

Existe varios tipos de relaveras según su método constructivo:

1.5.3.1. Método aguas arriba

A medida que el dique crece en altura, cada nueva etapa se apoya con su extremo aguas abajo sobre el dique anterior, mientras que su porción aguas arriba se ubica sobre los relaves finos

ya depositados, desplazando progresivamente el eje de la presa hacia aguas arriba (Esparza Villalta, 2009).

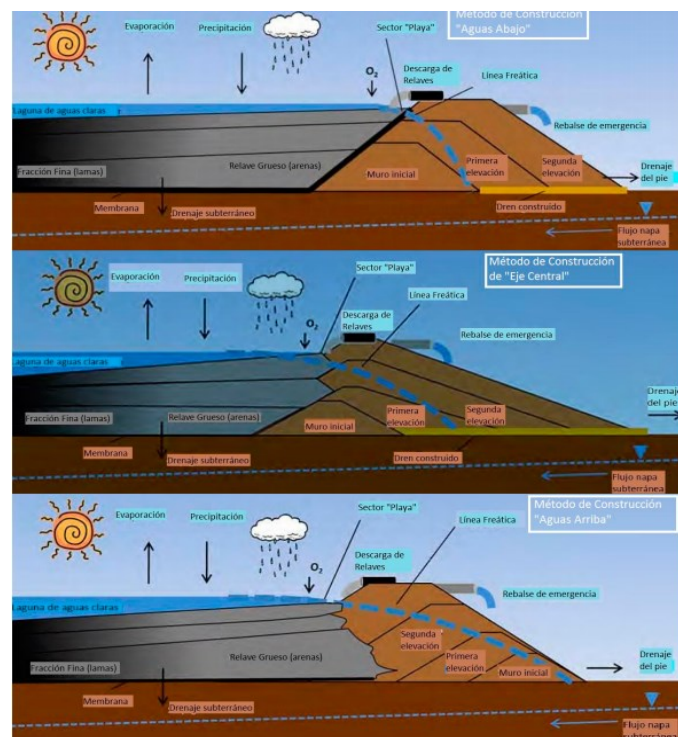
1.5.3.2. Método aguas abajo

El método de construcción "aguas abajo" se caracteriza porque cada nueva etapa del dique se apoya en la porción superior y aguas abajo de la etapa anterior (Ordoñez, 1984). Este procedimiento exige que la presa inicial sea impermeable para minimizar la infiltración, por lo que se construye con material de préstamo compactado.

1.5.3.3. Método línea central

Se inicia con un dique de arranque, la presa se eleva extendiendo y compactando el relave grueso en la parte superior, sobre las caras aguas arriba y aguas abajo, tal como se ilustra en la Figura 1. Los relaves ubicados en el talud aguas abajo deben ir siempre compactados para lograr la estabilidad de presas de tierra es desarrollar la máxima estabilidad en el extremo y áreas del talud aguas abajo (Ordoñez, 1984).

Figura 1
Métodos Constructivos de Tranques de Relaves.



Nota: Figura tomada de (SERNAGEOMIN, 2025)

La RCET, el depósito se encuentra en una fase operativa intermedia, caracterizada por la conformación progresiva de plataformas de depósito. Este concepto se aborda como un sistema dinámico en crecimiento, en el cual la estabilidad geotécnica depende principalmente del comportamiento mecánico de los relaves depositados y de la geometría de las plataformas formadas.

1.5.4. Marco normativo y regulatorio

El marco regulatorio que rige el diseño, construcción y operación de los depósitos de relaves en Ecuador se encuentra establecido principalmente en la Ley de Minería y en las guías técnicas emitidas por el MEM (2018). Este cuerpo normativo define los requisitos mínimos de seguridad y las restricciones aplicables a las relaveras, con el objetivo de garantizar su estabilidad física. La Ley de Minería establece en su Artículo 14 que se prohíbe el uso del método de construcción “aguas arriba” en depósitos de relaves, dado que este presenta mayores riesgos de inestabilidad. De manera obligatoria, la normativa exige el uso del método “aguas abajo”, incluyendo la construcción de una presa de arranque impermeabilizada. Asimismo, el Artículo 19 determina que la ARCERNNR es la entidad responsable de supervisar todas las etapas. La normativa ecuatoriana también incorpora lineamientos ambientales y de seguridad contenidos en la Guía Técnica para la Presentación de Proyectos de Diseño de Depósitos de Relaves (MEM, 2023). Entre estas disposiciones destacan:

- La obligación de ubicar los depósitos de relaves en zonas alejadas de cuerpos de agua naturales, con el fin de minimizar el riesgo de contaminación.
- La obligación de realizar estudios de caracterización geotécnica que permiten evaluar la estabilidad de los depósitos, considerando factores como geometría de las plataformas, la infiltración de agua y las propiedades físicas y mecánicas de los materiales depositados. Facilita al monitoreo geotécnico del depósito como son los desplazamiento horizontal y vertical.

1.5.5. Casos Relevantes de fallas de relaveras y su importancia para el contexto ecuatoriano.

El estudio de fallas históricas en depósitos de relaves constituye una herramienta fundamental para comprender los factores que comprometen la estabilidad física de estas estructuras. La revisión de estos casos permite identificar patrones de falla asociados a deficiencias de drenaje, saturación, licuefacción y métodos constructivos inadecuados. La Tabla 1 presenta casos representativos de fallas y evaluaciones críticas de relaveras, así como sus principales causas y lecciones relevantes para el contexto ecuatoriano. Esta información es crucial para contextualizar la necesidad de evaluar la estabilidad de la RCET y para justificar la aplicación de criterios técnicos rigurosos en su operación.

Tabla 1
Casos representativos de fallas o evaluaciones críticas de relaveras

Caso	Principales causales	Reflexión para Ecuador	Fotografía
Fundão, Samarco, Brasil (Giseli Modolo Vieira Machado, 2025), (Flavio Fonseca, 2017)	El colapso se atribuyó a la licuefacción progresiva de los relaves debido a un drenaje insuficiente y cambios en el método de construcción.	Refuerza la necesidad de monitoreo hidráulico y control del nivel freático.	 Nota: Figura tomada por Giseli Modolo 2025. <i>Colapso relavera Fundão</i>
Brumadinho, Brasil (Lumbroso, 2021) (ICMM, 2020)	Las investigaciones apuntan a la pérdida de resistencia al corte de los relaves debido a la saturación y a la falta de drenaje interno.	La importancia de caracterizar la permeabilidad y el comportamiento mecánico de los relaves.	 Nota: Figura tomada por Lumbroso, 2021 <i>Desastre Brumadinho.</i>

Estos casos evidencian que la estabilidad de una relavera depende directamente de factores como la saturación, la permeabilidad, el drenaje, la resistencia al corte y el método constructivo.

1.5.6. Caracterización geotécnica de relaves

El comportamiento de los relaves mineros se determina por sus propiedades físicas y mecánicas, además de su naturaleza del depósito o como fue tratado en la planta de beneficio (Chamorro & Evelin, 2020). Entre las propiedades físicas que se consideran son las siguientes:

1.5.6.1. Humedad.

La humedad se define como la relación entre la masa de agua intersticial o de poros y la masa de las partículas sólidas, según la norma ASTM D-2216-10.

1.5.6.2. Densidad.

La densidad aparente o densidad de volumen se la entiende como la masa de suelo seco por unidad de volumen de suelo inalterado, interpretando la relación entre sólidos y espacios porosos (Gutierrez, 2010).

1.5.6.3. Permeabilidad.

La permeabilidad del material depende del tamaño y continuidad de los vacíos entre partículas, estando condicionada por la granulometría y plasticidad de los relaves, así como por el método de disposición y la profundidad dentro del depósito. (British Standards Institution, 1991).

1.5.6.4. Gravedad específica del relave

La gravedad específica de la fase sólida de un suelo se define como la relación entre el peso unitario de sus partículas y el peso específico del agua, lo que significa que solo depende de su composición y no de la cantidad de materia (Juarez, 2005).

1.5.6.5. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico permite caracterizar la distribución de tamaños de partícula del material previamente procesado, constituyendo un parámetro fundamental para la clasificación geotécnica y la evaluación del comportamiento mecánico de los relaves (Braja, 2015).

- Tamiz Mecánico: La granulometría por tamizado se emplea para la caracterización de la fracción gruesa del material, mediante la separación de partículas a través de una serie de tamices normalizados.
- Difracción laser: La distribución del tamaño de partícula puede determinarse mediante difracción láser, conforme a la norma ISO 13320:2020, la cual define el diámetro esférico equivalente como el tamaño de una partícula esférica que reproduce el patrón de dispersión de luz observado durante la medición (ISO, 2020).

En referencia a las propiedades mecánicas de los relaves, necesarias para el análisis de la estabilidad, se pueden mencionar las siguientes:

1.5.6.6. Resistencia al corte

La modificación del estado tensional en una estructura de relaves genera deformaciones que pueden desencadenar su rotura. Frente a estas tensiones, la resistencia al corte de los relaves mismos constituye la propiedad fundamental que le permite soportar las cargas aplicadas y mantener su estabilidad (Vallejo, 2004). La caracterización de esta resistencia es, por lo tanto, crítica para cualquier evaluación de estabilidad.

1.5.6.7. Cohesión

La cohesión es la propiedad mecánica del suelo que representa la capacidad del material para mantener sus partículas unidas, aportando resistencia al corte incluso en ausencia de esfuerzo normal aplicado. (Braja, 2015).

1.5.6.8. Ángulo de fricción

El ángulo de fricción interna es la propiedad de los suelos que se relaciona con el ángulo máximo posible sobre el cual la pendiente de dicho material se encuentra en reposo sin existir subsidencias (Braja, 2015).

1.5.6.9. Límites de consistencia o Atterberg

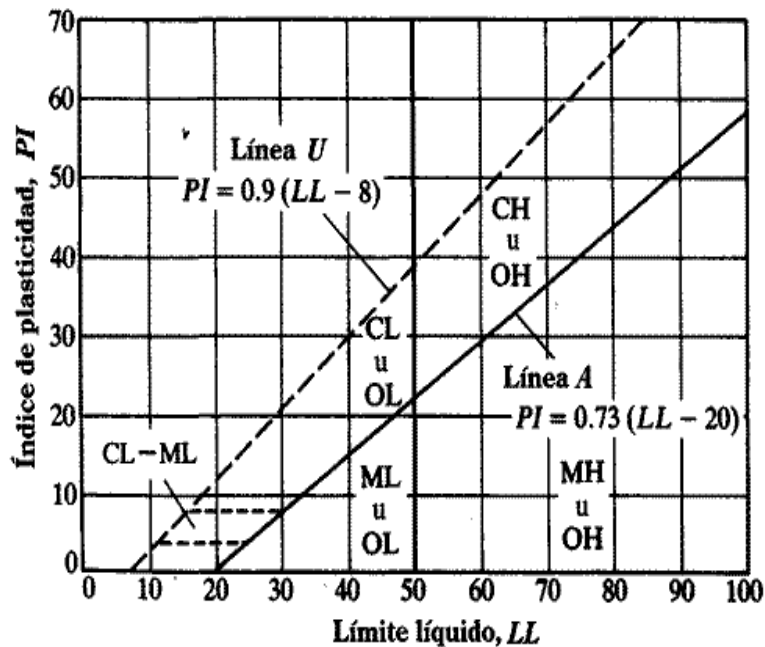
Los límites de consistencia son utilizados como una parte fundamental para varios sistemas de clasificación de ingeniería y caracteriza las fracciones de suelo fino con la carta de plasticidad

como se muestra en la Figura 2. Se entiende por límite líquido (LL), la humedad de un suelo en porcentaje en el límite que está definido de manera arbitraria entre los estados semilíquido y plástico. El límite plástico (LP) de un suelo se define como la humedad o contenido de agua en porcentaje que se encuentra en el límite ubicado entre los estados plásticos y semisólido (Braja, 2015).

Con la granulometría y límites de Atterberg se puede clasificar geotécnicamente al relave, mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Figura 2

Carta Plasticidad, Clasificación Unificada (SUCS)



Nota: Figura tomada por (American Society for Testing and Materials., 2019)

- a) **Limos (ML):** en general tienen permeabilidad mayor que las arcillas, por eso drenan relativamente mejor, aunque siguen siendo “bajos” comparados con arenas. Son muy sensibles a saturación y pueden perder resistencia con rapidez, especialmente si están sueltos.
- b) **Arcillas (CL):** tienen muy baja permeabilidad, por eso drenan mal y la disipación de presiones de poro toma mucho tiempo. Eso explica el hecho de muchos ensayos se adopta condición no drenada especialmente a corto plazo o con carga rápida.

1.5.7. Modelamiento geométrico de relaveras.

El modelamiento geométrico corresponde a la representación tridimensional de la geometría real de una relavera o plataforma de depósito, constituyendo la base para el análisis de estabilidad y la estimación de volúmenes de material almacenado (Luhmann et al, 2019). La geometría del depósito es uno de los factores más influyentes en la estabilidad geotécnica, ya que taludes más altos y con mayores inclinaciones incrementan las fuerzas actuantes y reducen el factor de seguridad. En este sentido, una correcta definición geométrica es indispensable para obtener resultados confiables en los análisis de estabilidad (Duncan & Wright, 2014).

Las técnicas modernas de levantamiento geométrico permiten obtener modelos digitales del terreno de alta resolución, a partir de los cuales es posible analizar la morfología del depósito, generar perfiles representativos y evaluar deformaciones en taludes y plataformas. Esta información resulta fundamental para el monitoreo operativo y la gestión segura de depósitos de relaves en fase activa de disposición (Shan & Toth, 2018).

1.5.8. Análisis de estabilidad de relaveras

El análisis de estabilidad de relaveras y plataformas de depósito se fundamenta en la evaluación del Factor de Seguridad (FS), definido como la relación entre la resistencia al corte disponible del suelo y las solicitaciones actuantes a lo largo de una superficie potencial de falla. Valores de FS mayores a la unidad indican condiciones de equilibrio estable, mientras que valores cercanos o inferiores a uno representan escenarios de inestabilidad (Fredlund & Rahardjo, 1993). Sin embargo, de acuerdo con criterios normativos internacionales, se adopta comúnmente un valor mínimo de FS igual a 1,5 para garantizar un margen adecuado de seguridad. (ANCOLD, 2019)

El comportamiento resistente de los relaves se describe comúnmente mediante el criterio de falla de Mohr–Coulomb, el cual relaciona el esfuerzo cortante con el esfuerzo normal efectivo a través de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna. Este criterio resulta adecuado para materiales granulares finos y suelos de baja plasticidad (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1967). En

el análisis de estabilidad de plataformas de relaves es necesario considerar diferentes condiciones de análisis, ya que el comportamiento del material puede variar significativamente según el estado hidráulico y las cargas actuantes. De forma general, se evalúan condiciones secas y saturadas las cuales permiten representar escenarios operativos y extremos que pueden afectar la seguridad del depósito (Duncan & Wright, 2014).

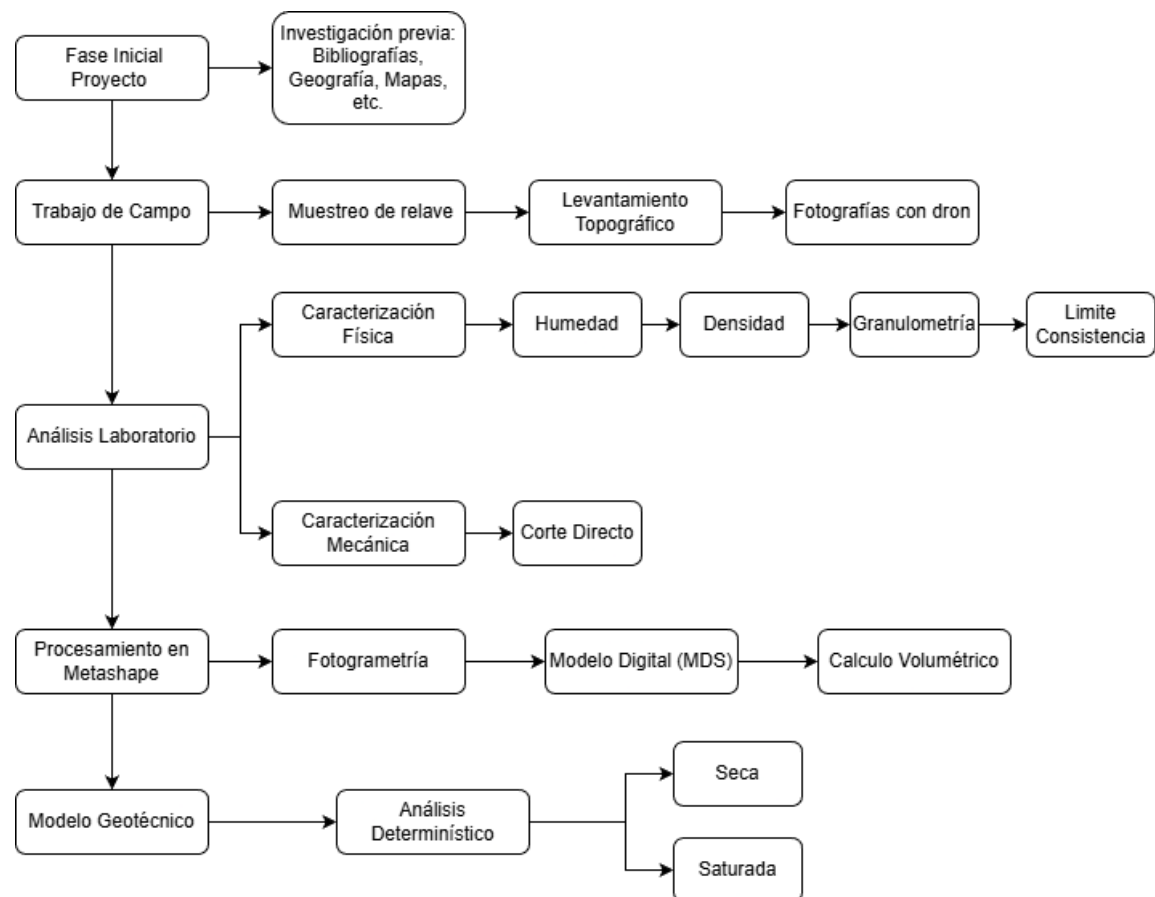
La condición seca considera únicamente el peso propio del material y la geometría del talud; la condición saturada incorpora el efecto del incremento de presiones de poro asociadas a la infiltración de agua y elevación del nivel freático. (Blight, 2010).

CAPÍTULO 2

2.1. Metodología.

La metodología aplicada en este estudio integra trabajo bibliográfico, trabajo de campo, ensayos de laboratorio y modelamiento para evaluar el comportamiento geotécnico del relave y la estabilidad del depósito, el esquema en la Figura 3. En primera instancia se realizó un previo estudio de la zona para luego la toma de muestras y el levantamiento geométrico del área mediante fotogrametría con dron. En laboratorio se desarrollaron los ensayos de caracterización física y mecánica, que incluyeron humedad natural, gravedad específica, granulometría, límites de consistencia y el ensayo de corte directo para obtener los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante. Finalmente, los resultados obtenidos se incorporaron en el software Slide2 de Rocscience para realizar análisis determinísticos de estabilidad bajo diferentes escenarios de carga, para evaluar la seguridad del depósito.

Figura 3
Diagrama de la metodología

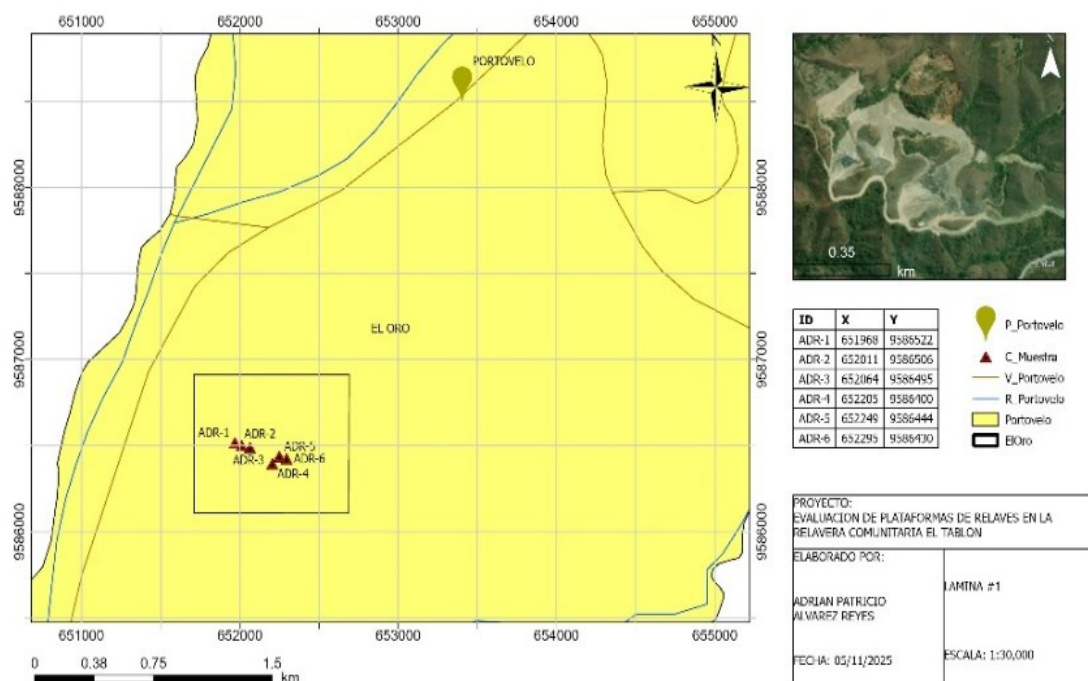


2.2. Área de estudio

La provincia de El Oro es una de las 24 provincias de Ecuador, ubicada en la región sur-occidental del país. El cantón Portovelo, ubicado al Sur-Este de la provincia, geográficamente contiene un relieve montañoso moderado, inicia su historia en el año 1549 como un asentamiento minero español, en el decreto el 5 agosto de 1980 se consolida como el cantón Portovelo (GAD Municipal Portovelo, 2020). Este cantón es reconocido por la gran actividad minera que se viene desarrollando desde el inicio del siglo pasado, conformando el distrito minero Zaruma-Portovelo (Ministerio de Ambiente y Agua, 2020).

Como muestra la figura 4, la RCET, se ubica en la parte inferior del cantón Portovelo, donde está concentrada la gran mayoría de las plantas de beneficio, se puede decir en el polígono industrial, el acceso de la relavera es por la vía Chinchas - Portovelo junto al Río Puyango. El área de la relavera es de 25 Ha.

Figura 4
Mapa de ubicación de la Relavera Comunitaria El Tablón



Nota: Mapa elaborado en la herramienta digital ArcGIS Pro.

El área de estudio presenta condiciones climáticas que influyen directamente en el comportamiento hidráulico geotécnico del depósito de relaves. De acuerdo con los registros del INAMHI, la zona de la RCET, ubicada en una zona intermedia de ladera, presenta una precipitación media anual aproximada de 1550 mm. Estas condiciones favorecen procesos de infiltración y saturación de los relaves, con posibles incrementos del nivel freático y reducción del esfuerzo efectivo, aspectos relevantes para la evaluación de la estabilidad del depósito.

2.3. Campaña de campo.

2.3.1. Campaña de muestreo:

La campaña consistió en la recolección de seis muestras de relave de dos plataformas (tres muestras por plataforma). La Tabla 2 indica las coordenadas en sistema de referencia UTM-17 WSG84 de los puntos de muestreo y la Figura 5 indica la georreferencia de las coordenadas.

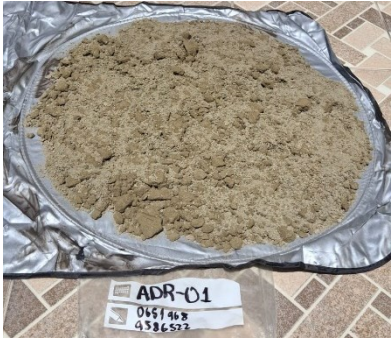



Figura 5

Imagen Satelital de la Relavera Comunitaria El Tablón de la ubicación de las muestras



Nota: La imagen satelital se georreferenciaron de Google Earth Pro.

Tabla 2
Coordenadas de las muestras colectadas

ID	X	Y	IDP	Imagen
ADR-1	651968.00	9586522.00	PL-1	
ADR-2	652011.00	9586506.00	PL-1	
ADR-3	652064.00	9586495.00	PL-1	
ADR-4	652205.00	9586400.00	PL-2	

ADR-5	652249.00	9586444.00	PL-2
--------------	-----------	------------	------



ADR-6	652295.00	9586430.00	PL-2
--------------	-----------	------------	------



Las muestras de relaves fueron recolectadas superficialmente en los domos que tiene cada una de las plataformas, como se muestra en la Figura 6.

2.3.2. Campaña de levantamiento topográfico

La campaña de levantamiento topográfico por dron se diseñó un plan de vuelo con DroneDeploy. Las imágenes fueron capturadas a una altura de 80 metros en un área de 25 Ha. Para asegurar consistencia en la escala. Se utilizó Mavic 3 pro-Enterprise, que contiene un RTK integrado donde me da una buena precisión con un error inferior a 5 cm.

Figura 6

a) Recolección de muestra ; b) levantamiento topográfico con dron



2.4. Análisis de laboratorio

La caracterización física y mecánica de las muestras de relaves se realizó en el Laboratorio de Geotécnica y Construcción de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL.

2.4.1. Caracterización física

2.4.1.1. Humedad Natural

Se determinó el contenido de humedad natural de las muestras de relave siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM D2216-10 (ASTM International, 2010). Las muestras recolectadas en campo fueron almacenadas en recipientes herméticos para minimizar la pérdida de humedad por evaporación hasta el momento del ensayo, el cual se realizó cuatro días después de la toma de muestra.

Inicialmente se procedió a la identificación y pesaje de los recipientes vacíos, registrando su masa recipiente. A continuación, se colocó en cada recipiente una porción representativa de la muestra de relave, obteniéndose y registrándose la masa conjunta del recipiente con la muestra húmeda [m_w]. Posteriormente, los recipientes fueron introducidos en un horno de convección forzada y sometidos a una temperatura constante de 110 ± 5 °C durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de secado, las muestras se retiraron del horno y se pesaron de inmediato para obtener la masa del recipiente con la muestra completamente seca [m_s].

La humedad natural se obtuvo, dividiendo la masa de agua evaporada durante el secado entre la masa seca del suelo, empleando la ecuación 2.1.

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad 2.1$$

2.4.1.2. Lavado de la muestra sobre un tamiz

Para cuantificar la fracción de material más fino que la malla No. 325 (45 μm), se aplicó el método de lavado sobre las muestras de relave representativas de cada plataforma de estudio. En primer lugar, se obtuvo una muestra representativa mediante el cuarteo del material total utilizando un cuarteador tipo riffle (a), hasta obtener una porción de aproximada de 300 g que preservara la distribución granulométrica original.

Posteriormente, la muestra fue acondicionada mediante una desaglomeración suave en mortero de porcelana, aplicando movimientos rotatorios controlados con el fin de liberar las partículas finas adheridas sin fracturar los granos primarios, asegurando así la representatividad del proceso de lavado.

A continuación, la muestra fue transferida a una bandeja, el material se vertió de manera progresiva sobre un tamiz No. 325, colocándose el conjunto bajo un flujo suave de agua mientras se realizaban movimientos circulares (b). El proceso de lavado se realizó durante aproximadamente 30 minutos, hasta que el agua efluente se observó transparente y libre de partículas en suspensión, criterio verificado mediante decantación en un recipiente. Una vez finalizado el lavado, el material retenido en el tamiz fue secado en una estufa a 110 °C. Finalmente, la diferencia entre la masa inicial [m_{i0}] de la muestra seca y la masa del material retenido [m_{f0}] después del secado permitió calcular el porcentaje de finos arrastrados durante el lavado, correspondiente a la fracción menor a 45 μm , con lo que se obtuvo el porcentaje de fino, empleando la ecuación 2.2.

$$\% \textit{Fino} = \frac{m_{fo}}{m_{io}} \times 100 \quad 2.2$$

De igual manera se aplicó un segundo lavado, para recuperar el fino, necesario para el ensayo de granulometría fina, esta vez se aplicó 100 g de muestra original, sin apelmazar. El procedimiento es el mismo.

2.4.1.3. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM E11, (ASTM International, 2007). Este procedimiento permitió evaluar tanto la fracción retenida como la fracción pasante de la malla No. 325, previamente obtenida en el ensayo de lavado.

Se procedió al tamizado mecánico utilizando la serie completa de mallas (N.º 10, 20, 40, 100, 140, 200, 325 y fondo), ensambladas en forma de torre (d). La tamizadora vibratoria operó durante cinco minutos, asegurando una separación adecuada de las fracciones granulométricas (e). Una vez finalizado el proceso, la torre de tamices fue desmontada y el material retenido en cada malla se transfirió cuidadosamente a bandejas previamente pesadas (f), registrando el peso individual de cada fracción. El procedimiento completo se muestra en la Figura 7, Con la información obtenida se construyó la mitad de la curva granulométrica y se determinaron los parámetros para la caracterización geotécnica del relave.

Figura 7

Proceso para realizar el lavado y granulometría mecanizada



El análisis granulométrico mediante difracción láser se rige por la norma ISO 13320:2020, la cual define el principio óptico del método y los parámetros esenciales para la medición. El procedimiento experimental se desarrolló conforme al Protocolo de Laboratorio del Procesamiento Mineral-ESPOL, con el lavado del fino previamente guardado de cada muestra.

La medición del tamaño de partícula se realizó mediante difracción láser utilizando un equipo HORIBA LA-300, bajo control de transmitancia en un rango óptimo de 70–95 %, con agitación progresiva del medio dispersante y medición previa del blanco. El análisis se efectuó empleando un índice de refracción constante correspondiente al cuarzo.

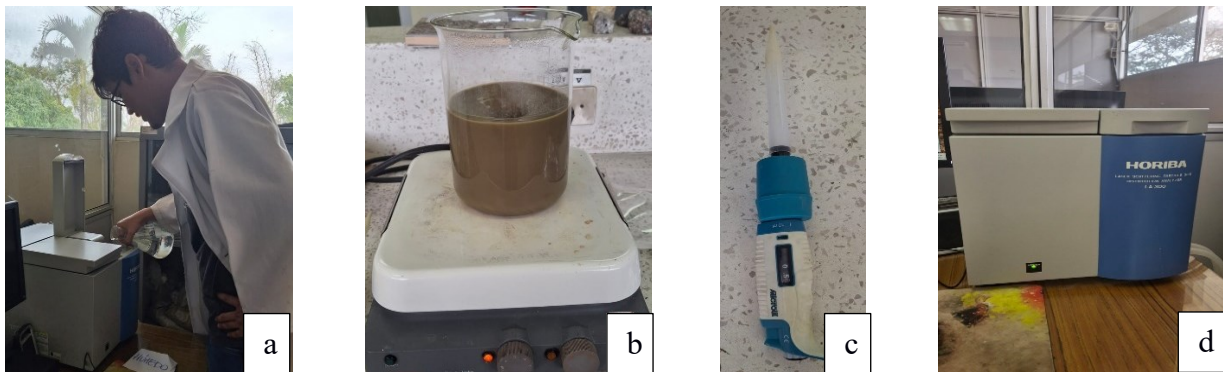
La Figura 8 muestra el procedimiento previo a la medición granulométrica mediante difracción laser, los recipientes de laboratorio fueron acondicionados mediante enjuague con agua destilada. Una de las muestras correspondiente al segundo lavado se colocó en un vaso de precipitados de 2 L, se vertió 1 L de agua destilada, volumen inferior al originalmente considerado (500 mL), debido a que este último generaba valores de transmitancia cercanos al 65 %. En consecuencia, se ajustó el volumen de dispersante mediante dilución progresiva con agua destilada

hasta alcanzar una transmitancia promedio cercana al 80 %, considerada adecuada para la medición (a).

La suspensión fue mantenida en agitación constante mediante un agitador magnético (b). Posteriormente, durante la agitación, se extrajo 0.5 mL a 1 mL utilizando una micropipeta (c), la cual fue introducida en el compartimento de medición del equipo HORIBA LA-300 para la adquisición de datos granulométrico de 1 submuestra (d).

Figura 8

Proceso para realizar la ejecución del ensayo de granulometría fina



Este procedimiento fue repetido de manera sistemática para cada una de las seis muestras, preparándose seis submuestras independientes por muestra. Cada submuestra obtuvo 6 curvas estadísticas, obteniéndose un total de 36 mediciones por muestra, lo que permitió seleccionar las curvas representativas promedio conforme a los criterios establecidos en el protocolo de laboratorio y ver su porcentaje de pasante para cada tamaño, logrando completar la mitad faltante de la curva granulométrica. (Washington, 2025).

2.4.1.4. Ensayo de gravedad específica

El ensayo de gravedad específica de los sólidos se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM D854-14, (ASTM International, 2014), utilizando un picnómetro de 500 mL. Para el procedimiento mostrado en la Figura 9, se tomó una muestra representativa de relave seco y se tamizó a través de la malla N.º 4. En concordancia con la norma, se empleó una masa de 50 ± 10 g de material, apropiada para suelos con alta proporción de limos y finos. Antes de incorporar la muestra, se realizó la calibración del picnómetro, llenándolo únicamente con agua destilada hasta

la marca de aforo y registrando su masa [W_{mw}] (a). Se midió además la temperatura del agua, necesaria para obtener la densidad correspondiente según las tablas de la norma. Luego, la muestra seca se introdujo cuidadosamente en el picnómetro utilizando un embudo (b), añadiéndose agua hasta cubrir la mitad de la base esférica, con ello el conjunto se agitó suavemente (c). Posteriormente, se completó el llenado del picnómetro hasta la línea de aforo y se registró la masa del sistema picnómetro + muestra + agua [W_{mws}]. Finalmente, el contenido fue vaciado a una bandeja para el secado en el horno a 110 °C durante 24 horas, obteniéndose la masa de los sólidos secos [W_s]. Con los datos corregidos por temperatura, se determinó la gravedad específica de los sólidos del relave (Gs) conforme a la norma ASTM D854, empleando la ecuación 2.3.

$$Gs = \frac{\delta s}{\delta_{agua}^{\circ C}} = \frac{W_s}{(W_{mw} - (W_{mws} - W_s))} \quad 2.3$$

Figura 9

Proceso para realizar la ejecución del ensayo de gravedad específica.



2.4.1.5. Límites de consistencia

La determinación de los límites de consistencia se realizó conforme a lo establecido en la norma ASTM D4318-17e1 (ASTM International, 2017). Para el procedimiento mostrado en la Figura 10, se tomó una muestra de aproximadamente 200 g de relave secado y se tamizó mediante el tamiz N.º 40, obteniéndose así el material fino requerido por la norma. Del material pasante se tomó solo 100 g para la ejecución de los ensayos de Límite Líquido (LL) y Límite Plástico (LP). Esta preparación asegura la representatividad de la muestra con características uniformes, para el cálculo el Índice Plástico (IP).

2.4.1.6. Límite Líquido

Para la determinación del Límite Líquido (LL), de los 100 g se vertió en un mortero de porcelana y se añadió agua de forma progresiva (a). Inicialmente se incorporaron 10 mL, y posteriormente incrementos adicionales de 1 mL, hasta obtener una pasta homogénea y de consistencia adecuada (b), según lo establecido en la norma ASTM D4318-17e1 (2017).

La pasta preparada se distribuyó en la copa de Casagrande formando una capa uniforme con geometría semicircular. Luego se practicó un surco utilizando el ranurador estándar especificado por la norma. Mediante el giro constante de la manivela a la velocidad reglamentaria (dos golpes por segundo), se registró el número de golpes necesarios para que las dos mitades del surco se unieran a lo largo de una longitud de 13 mm (c), criterio definido por ASTM D4318 para identificar el cierre del surco.

Se recolecta una porción representativa de la muestra [mwr] correspondiente a cada serie de golpes fue extraída para determinar su contenido de humedad, con su respectivo peso del envase [mr]. El procedimiento se repitió para obtener al menos cuatro puntos en la curva de fluidez, con números de golpes aproximados de 15, 25, 30 y 35, asegurando así la calidad y representatividad de la gráfica necesaria para la determinación del Límite Líquido, para luego secarlo en el horno y tener la muestra seca [msr], aplicamos la ecuación 2.4 para su contenido de humedad.

2.4.1.7. Límite Plástico

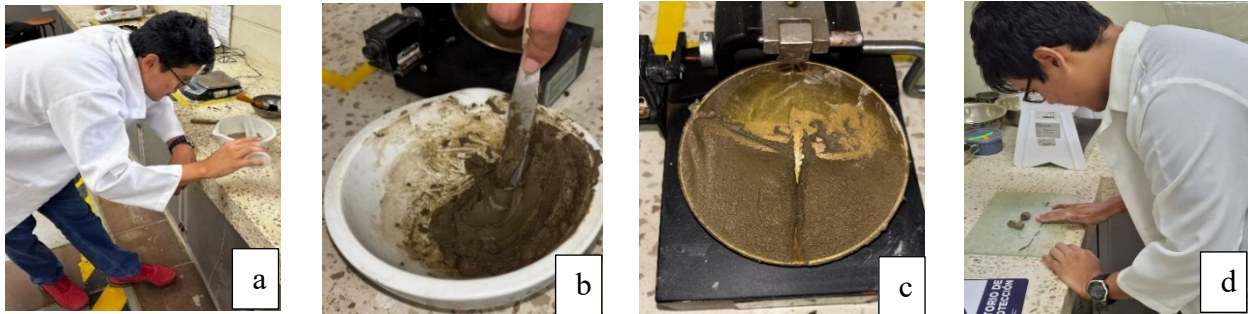
Para la determinación del Límite Plástico (LP), se empleó el material sobrante de la prueba anterior, donde se tomaron una porción de 16 g de la pasta fina y se amasaron manualmente hasta obtener una consistencia uniforme que no se adhiriera a los dedos, conforme a los requisitos de la norma ASTM D4318-17e1 (2017).

Cada porción fue colocada sobre una placa de vidrio y rodada con la palma de la mano aplicando una presión suave y constante (d), con el fin de formar cilindros delgados y uniformes. La norma establece que el ensayo debe realizarse hasta que las tiras alcancen un diámetro de 3.2

mm (1/8 de pulgada). Una vez que los cilindros alcanzaron dicha dimensión, estos comenzaron a agrietarse y romperse, criterio que define el momento apropiado para detener el amasado.

Figura 10

Proceso para realizar el ensayo de límite líquido y límite plástico.



El material fracturado fue recolectado inmediatamente y transferido a un recipiente antes pesado [m_{wr}], para luego secarlo al horno y tomar el dato de la muestra seca [m_{sr}] y con la misma ecuación 2.4 se determinó su contenido de humedad, parámetro necesario para el cálculo del Límite Plástico. Este procedimiento se repitió con varias porciones adicionales para garantizar la repetibilidad y representatividad del resultado, tal como exige ASTM D4318 para la determinación confiable del índice de plasticidad.

$$\text{Humedad} [\%] = \frac{m_{sr} - m_r}{m_{wr} - m_{sr}} = \frac{m_{seca}}{m_{evaporada}} \quad 2.4$$

2.4.1.8. Índice de plasticidad

El índice de plasticidad representa el rango de humedad en el cual un suelo presenta comportamiento plástico y se define como la diferencia entre el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), conforme a la ecuación 2.5.

$$IP = \frac{LL}{LP} \quad 2.5$$

2.4.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica del relave para determinar sus parámetros de resistencia al corte y su comportamiento bajo procesos de compactación. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la estabilidad del depósito y modelar su respuesta frente a diferentes condiciones de carga.

2.4.2.1. Ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo se realizó conforme a la norma ASTM D3080/D3080M-11, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (ASTM International, 2011). Para la ejecución del ensayo mostrada en la Figura 11, se empleó una caja de corte cuadrada de $60 \times 60 \times 20$ mm, con un volumen interno aproximado de 72 cm^3 y un área de 36 cm^2 [Ac].

Previamente al ensayo, se determinaron las propiedades físicas iniciales de cada muestra de relave, incluyendo el contenido de humedad natural [w], la gravedad específica de los sólidos [Gs], saturación [S] y la altura de plataforma (H) asociada al punto de muestreo, especialmente en el peso específico aparente [γ], donde se calculó mediante la ecuación 2.6. A partir de cada muestra seleccionada se prepararon tres probetas, las cuales fueron compactadas directamente en la caja de corte (a), procurando una densidad y un acondicionamiento uniformes para garantizar la repetibilidad de los resultados, luego de completar la caja con el relave se lo coloca directo a la máquina de corte directo (b).

Cada probeta fue sometida inicialmente a un esfuerzo vertical (σ_v) de la plataforma, calculado por la ecuación 2.7, al cual se adicionó un esfuerzo incremental (σ'_v) de los camiones, definiéndose tres niveles de esfuerzo normal equivalentes al 50 %, 100 % y 200 % del esfuerzo vertical de referencia. Estos valores fueron calculados con el objetivo de representar condiciones de confinamiento relevantes para el comportamiento geotécnico del relave, aplicando la ecuación 2.8. Posteriormente, se aplicó un esfuerzo cortante mediante un desplazamiento horizontal controlado, manteniendo una velocidad constante, de acuerdo con las condiciones de consolidación y drenaje establecidas en la norma. Una vez finalizada el ensayo se retira y se desarma la caja para tener el resultado final de la muestra cortada (c).

Además, durante el desarrollo del ensayo, el sistema de adquisición de datos registró de forma continua la fuerza cortante [F_c], la deformación horizontal y la deformación vertical, permitiendo la obtención de las curvas de esfuerzo cortante versus deformación horizontal para

cada probeta. A partir de estos registros se determinó el esfuerzo cortante máximo correspondiente a cada nivel de esfuerzo normal, mediante la ecuación 2.9. Finalmente, y siguiendo el criterio de falla de Mohr-Coulomb, se construyó la relación esfuerzo cortante efectivo (τ') versus esfuerzo normal efectivo ($\sigma'n$), a partir de la cual se obtuvieron los parámetros mecánicos fundamentales del relave: la cohesión efectiva (c') y el ángulo de fricción interna (ϕ'), utilizados posteriormente en los análisis de estabilidad de taludes y depósitos de relaves.

$$\gamma_a = \frac{(1+w)*G_s*\gamma_w}{1+\frac{w*G_s}{s}} \quad 2.6$$

Se asume el valor de saturación [S], con un valor de 80%, porque los baldes de los camiones que transportan los relaves se observa una película de agua, en su superficie (Rodríguez, 2009).

$$\sigma_v \text{ [kPa]} = (\gamma_s * H) \quad 2.7$$

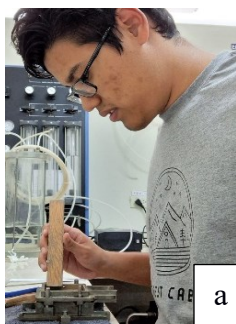
$$\sigma_n \text{ [kPa]} = \sigma_v * [50\%, 100\%, 200\%] + \sigma_v' \quad 2.8$$

Este esfuerzo vertical adicional se calculó el peso del camión y el área del camión, valores teóricos y bibliográficos.

$$\tau \text{ max [kPa]} = \frac{F_c \text{ [N]}}{A_c \text{ [mm}^2\text{]}} \quad 2.9$$

Figura 11

Proceso para realizar la ejecución del ensayo de corte directo



2.5. Procesamiento y análisis digital

El procesamiento de la información levantada en campo se realizó mediante herramientas digitales especializadas, integrando el modelamiento geométrico del depósito y el análisis de estabilidad geotécnica. Este enfoque permitió definir con precisión la geometría y los volúmenes

del depósito, así como evaluar su estabilidad bajo distintas condiciones operativas, sirviendo de base para los análisis desarrollados en los apartados siguientes.

2.5.1. Modelamiento geométrico y calculo volumétrico mediante fotogrametría

El modelamiento tridimensional del depósito se desarrolló con el software Agisoft Metashape Professional (2021), utilizando imágenes adquiridas mediante dron. Se realizó la orientación de las fotos, generándose una nube de puntos densa, con ese proceso se realiza los siguientes como nube de puntos densa, MDE, para finalmente el ortomosaico, además para un procesamiento 3D se realizó el mallado y modelo teselas. Finalmente, los valores geométricos básicos, se crea una polilínea donde se esta la plataforma y dará el perfil de la polilínea, dándose la altura de la plataforma y el ángulo de inclinación. Ahora para el cálculo de volumen se encierra en un polígono toda el área de las plataformas.

2.5.2. Modelamiento geotécnico en Slide2.

El análisis de estabilidad se desarrolló empleando el software Slide2 (Rocscience Inc., 2021), el cual utiliza métodos de equilibrio límite para determinar el Factor de Seguridad (FS) de taludes y presas de relaves. A partir del modelo geométrico generado por los perfiles, se representó el modelo en slide 2. Se definieron los parámetros en laboratorio: peso unitario (γ), cohesión efectiva (c') y ángulo de fricción interna (ϕ'). Estos valores se incorporaron en Slide2 empleando el criterio de resistencia de Mohr–Coulomb. El modelo resultante constituye la representación geotécnica base para la evaluación determinística de estabilidad.

Escenarios de análisis determinístico, hay varias condiciones que se analizaron:

2.5.2.1. Condiciones secas

Considera únicamente el peso propio del material y el nivel freático base. Este escenario establece el Factor de Seguridad fundamental bajo condiciones normales de operación.

2.5.2.2. Condiciones saturadas

Simula un incremento del nivel freático debido a infiltración excesiva, lluvias intensas o acumulación de agua no drenada. Este escenario permite evaluar la disminución de la resistencia al corte y su efecto en la estabilidad.

En los dos casos, Slide2 ejecutó una búsqueda automática de superficies potenciales de falla mediante el método de Bishop Simplificado y “GLE-Morgenstern Price “seleccionando la que produce el menor Factor de Seguridad. Los resultados permiten identificar las condiciones más críticas para el depósito y constituyen la base para el análisis de estabilidad.

CAPÍTULO 3

3. Resultados y análisis

3.1. Caracterización física

La caracterización física de los relaves se realizó mediante la determinación de la humedad natural, la gravedad específica, la granulometría y la clasificación SUCS. Estos ensayos permiten comprender el comportamiento del material en su estado actual y constituyen la base para la evaluación mecánica y el análisis de estabilidad del depósito.

3.1.1. Humedad natural

Las humedades naturales obtenidas para las muestras ADR-1, ADR-2, ADR-3, presentaron valores comprendidos entre 7 a 14 %, mientras que las muestras ADR-4, ADR-5, ADR-6, contiene los datos más elevados de humedad de 20% exceptuando el ADR-5 que tiene el valor 10%. Se observa en la Tabla 3, más detalle de los datos.

3.1.2. Gravedad específica

Los valores de gravedad específica (Gs) determinados mediante el método del picnómetro se encuentran dentro del rango esperado de los sólidos de suelos que contiene granos minerales o rocas estériles, típicamente entre 2.60 y 2.80 (Holtz et al., 2011). Estos valores son consistentes con materiales derivados de trituración de roca con contenido de cuarzo, feldespáticos y sulfuros metálicos minoritarios. La gravedad específica se utiliza posteriormente para el cálculo de densidades, además de representar un indicador indirecto del grado de mineralización original del material. La gravedad específica de las muestras de relaves presentó valores comprendidos entre 2.73 y 2.87. Los valores más altos correspondieron a las muestras ADR-2 y ADR-4, mientras que las demás muestras registraron un valor promedio cercano a 2.74 todos los valores se observan en la Tabla 3. En caso de requerirse un valor representativo por plataforma, los promedios obtenidos fueron de 2.76 para la Plataforma 1 y 2.78 para la Plataforma 2.

3.1.3. Peso específico aparente del relave

Los resultados obtenidos para cada muestra de relave, a partir de los cálculos realizados mediante la ecuación 2.6, muestran un peso específico promedio del orden de 21 kN/m³, mostrado en la Tabla 3. Este valor es consistente con los resultados reportados en estudios académicos realizados en la misma zona, donde se obtuvo un peso específico aproximado de 20 kN/m³ (Núñez et al., 2022), lo que evidencia la coherencia y confiabilidad de los resultados obtenidos en el presente estudio.

Tabla 3
Propiedades físicas y masa-volumen del relave

Practica	Plataforma	w	Gs	Y_húmedo [kN/m ³]	ρ_húmedo [kg/m ³]
ADR-1		0.14	2.73	20.66	2106.25
ADR-2	PL1	0.07	2.85	23.75	2421.49
ADR-3		0.10	2.74	22.02	2244.65
ADR-4		0.22	2.87	19.31	1968.05
ADR-5	PL2	0.11	2.76	21.79	2220.84
ADR-6		0.21	2.75	19.05	1941.71

3.1.4. Análisis Granulométrica

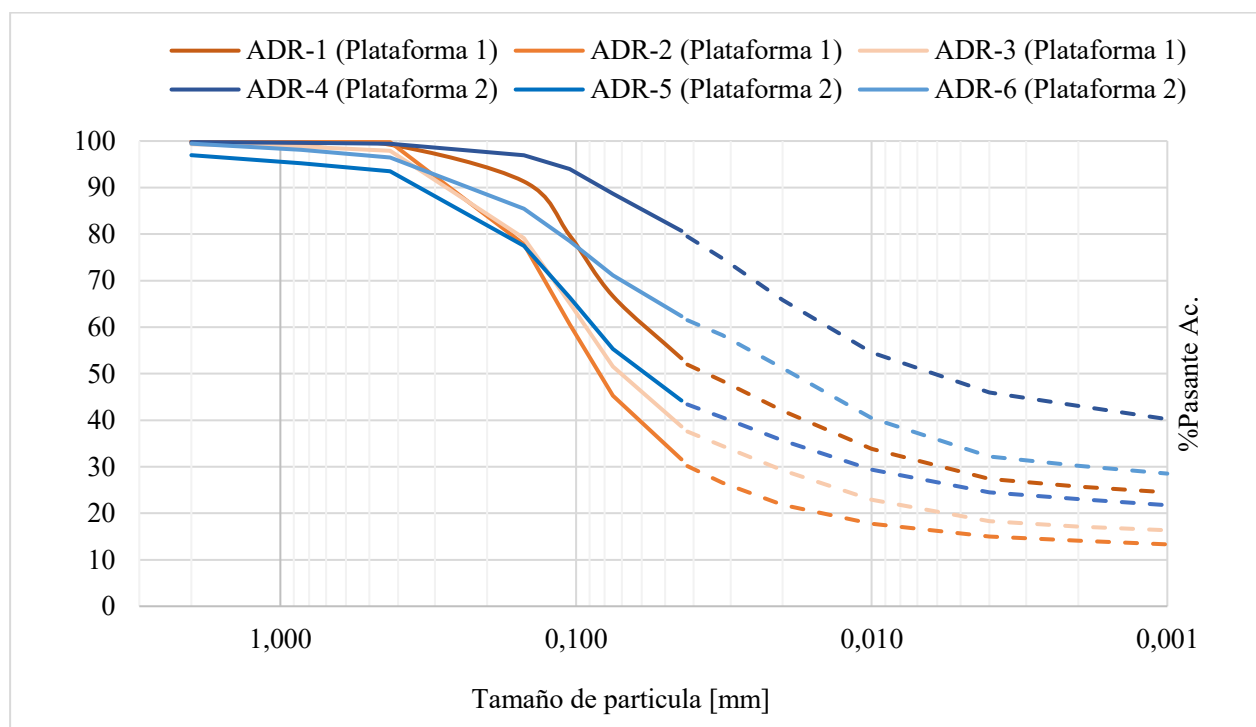
Se realizó la curva granulométrica del relave definida por medio del lavado de finos, granulometría por tamices para la fracción gruesa con la norma [ASTM E11], además de la difracción por láser para la fracción fina con la norma [ISO 13320:2020]. Esta integración permitió obtener la curva completa de distribución de tamaños, en el rango de partículas desde arena fina hasta arcilla. Los resultados de porcentaje de la Figura 12 muestra las curvas granulométricas de los relaves de cada plataforma de los relaves de cada plataforma.

Todas las muestras se caracterizan por un alto contenido de material fino, con porcentajes significativos de partículas menores a 0.075 mm. La pendiente pronunciada de las curvas en el rango comprendido entre aproximadamente 0.1 mm y 0.01 mm indica una transición dominante hacia fracciones limo-arcillosas, lo cual sugiere que el comportamiento mecánico del material estará fuertemente influenciado por la fracción fina.

Asimismo, la similitud observada en el conjunto de curvas granulométricas correspondientes a cada plataforma tiene un origen común proveniente de las plantas de beneficio, el cual contiene una granulometría característica asociada al tipo de mineral procesado. No obstante, se identifican diferencias en la distribución de la fracción fina entre algunas muestras, lo que evidencia la existencia de variabilidad local dentro del depósito, posiblemente asociada a condiciones operativas o variaciones en los procesos de tratamiento.

Figura 12

Curva Granulométricas de las muestras de relaves por plataforma

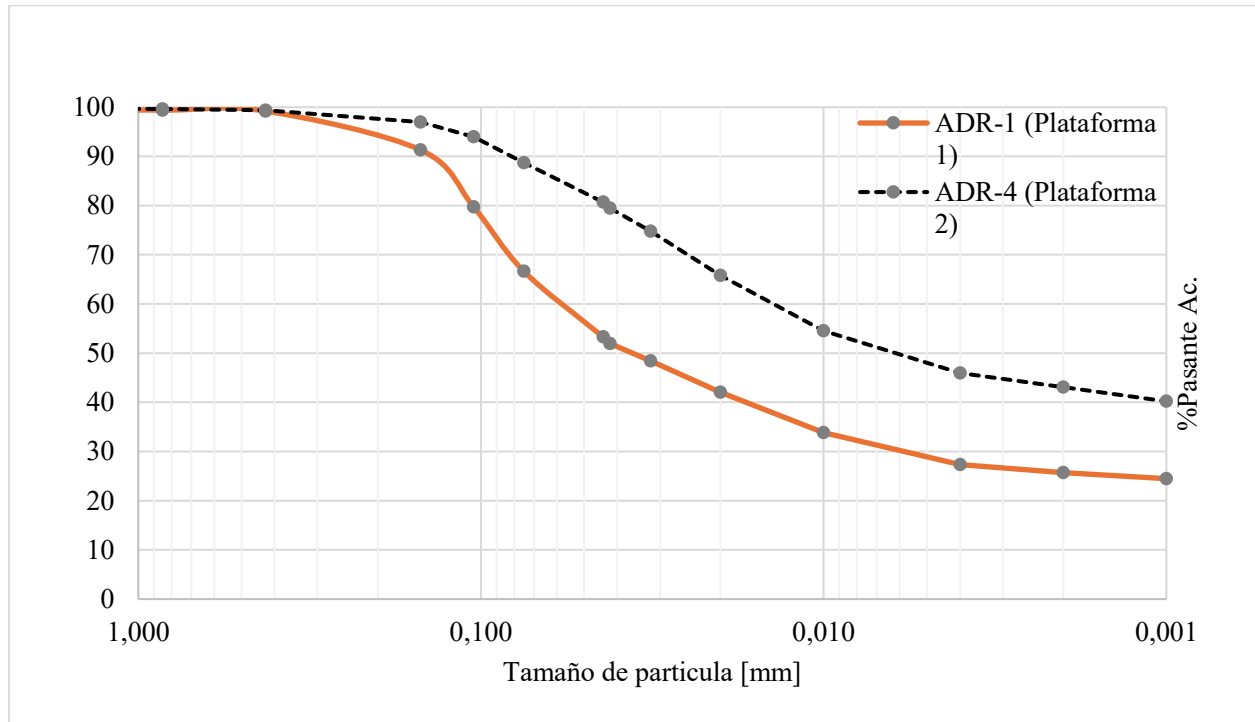


El análisis comparativo de la Figura 13 de las curvas granulométricas representativas indica que ambas plataformas presentan una distribución semejante en la fracción gruesa, lo que permite inferir condiciones similares de origen y deposición. Sin embargo, la Plataforma 2 presenta una mayor concentración de partículas finas, especialmente en tamaños inferiores a 0.075 mm, en relación con la Plataforma 1. Esta característica granulométrica influye directamente en el comportamiento hidráulico del material, al disminuir su permeabilidad y favorecer la acumulación de agua. Como consecuencia, se genera un aumento de la presión de poros, lo que repercute de manera negativa en el comportamiento geotécnico y en la estabilidad general de la plataforma. A

diferencia de la Plataforma 1 que muestra una granulometría más gruesa y una mejor capacidad de drenaje, asociándose a un comportamiento estructural más estable.

Figura 13

Curva granulométrica de las muestras de cada plataforma que tiene mayor porcentaje de fino.



3.1.5. Límites de consistencia y plasticidad

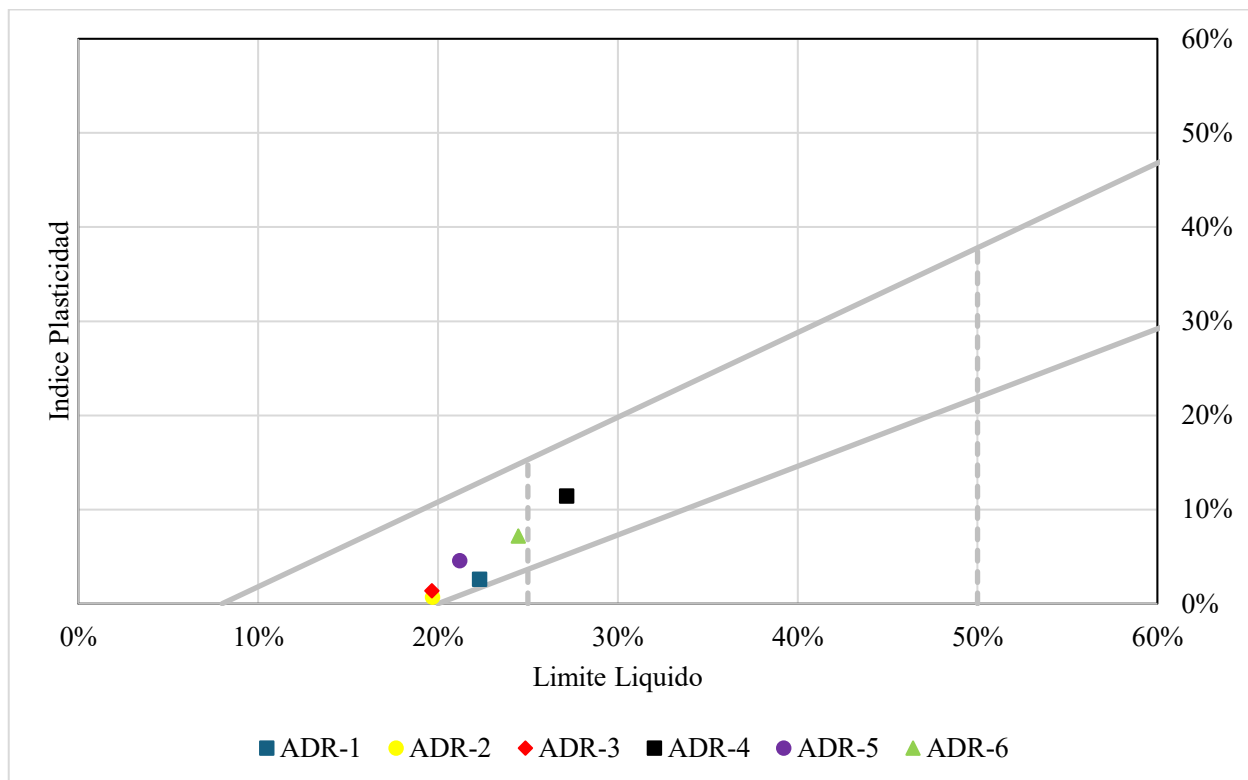
Los resultados de los límites de consistencia evidencian que todas las muestras de relave presentan baja plasticidad, esto es asociado principalmente a la cantidad de partículas limosas y una baja fracción de arcillas esto confirma la distribución granulométrica que presenta un mayor porcentaje en los tamaños entre 0.075 mm a 0.002 mm. Los resultados de cada plataforma son muy diferentes y en la Figura 14 muestra valores de los límites de Atterberg por medio de la carta de plasticidad:

- Plataforma 1: Las muestras presentan un límite líquido promedio de 20.56 % y un índice de plasticidad promedio de 1.54 %, lo que confirma su baja plasticidad. Esta condición se evidenció durante la ejecución del ensayo, ya que el material presentó dificultades al ser colocado en la cuchara de Casagrande y al intentar formar la media luna, agrietándose con facilidad debido a su limitada capacidad de deformación.

- Plataforma 2: Las muestras presentan un límite líquido promedio de 24.28 % y un índice de plasticidad promedio de 7.72 %, lo que evidencia un comportamiento de plasticidad moderada. Esta condición se observó durante la ejecución de los ensayos, ya que el material permitió una manipulación más sencilla al ser colocado en la cuchara de Casagrande y al formar la media luna, sin presentar agrietamientos prematuros. Asimismo, durante la determinación del límite plástico, el material mostró una buena capacidad de deformación, permitiendo la formación de cilindros que se estiraban por un mayor tiempo sin agrietarse, lo que confirma su mayor plasticidad en comparación con otras muestras.

Figura 14

Carta de Plasticidad de Casa Grande (Límite Líquido vs Índice Plasticidad)



3.1.6. Clasificación SUCS

En la Tabla 4 se observa la clasificación e identificación del suelo de cada muestra de relave y al analizar la clasificación SUCS por plataforma, se observa un comportamiento diferente:

- En la Plataforma 1 predomina la clasificación ML, correspondiente a limos de baja plasticidad. No obstante, la presencia de una fracción arenosa significativa, evidenciada por el porcentaje de material grueso, permite precisar que el relave presenta un carácter limo arenoso. Desde el punto de vista hidráulico, este material exhibe un comportamiento intermedio, con permeabilidad moderada a baja, típica de los limos; sin embargo, la fracción arenosa contribuye a mejorar las condiciones de drenaje. Cabe destacar que la muestra ADR-2 presenta un contenido de finos menor, lo que justifica su identificación como arena limosa, mediante la clasificación SUCS.
- En la Plataforma 2 predominan las clasificaciones CL, correspondientes a arcillas de baja plasticidad. Este comportamiento refleja una mayor proporción de finos, lo que confiere al relave una respuesta hidráulica menos favorable, caracterizada por una permeabilidad baja y una mayor capacidad de retención de agua. En el análisis geotécnico, el suelo presenta mayores presiones de poros, especialmente bajo condiciones no drenadas. Cabe destacar que la muestra ADR-5 presenta una clasificación arcilla-limo arenoso de baja plasticidad, lo que evidencia la presencia de una fracción arenosa secundaria; sin embargo, esta no resulta suficiente para modificar de forma significativa el comportamiento hidráulico general de la plataforma.

Tabla 4
Clasificación de los relaves

ID	Límites de Consistencia			Granulometría		Clasificación de suelos		
	LL [%]	LP [%]	IP [%]	%Grueso	%Fino	Carta Plasticidad	SUCS	Simbología
Plataforma 1								
ADR-1	22.31%	19.74%	2.57%	33.35	66.65	Limo de Baja Plasticidad	Limo arenoso de baja plasticidad.	ML
ADR-2	19.70%	19.01%	0.68%	54.75	45.25	Limo de Baja Plasticidad	Arena Limosa	ML
ADR-3	19.67%	18.30%	1.36%	48.46	51.54	Limo de Baja Plasticidad	Limo arenoso de baja plasticidad.	ML
Plataforma 2								
ADR-4	27.15%	15.75%	11.41%	11.29	88.71	Arcilla de Baja Plasticidad	Arcilla de baja plasticidad	CL
ADR-5	21.21%	16.65%	4.56%	44.67	55.33	Arcilla-Limo Baja Plasticidad	Arcilla-Limo arenosa de baja plasticidad	CL-ML
ADR-6	24.47%	17.29%	7.18%	28.87	71.13	Arcilla de Baja Plasticidad	Arcilla de baja plasticidad ligeramente arenosa	CL

3.1.7. Selección de muestras representativas y evaluación del riesgo geotécnico por tipo de suelo para cada plataforma

Con base en los resultados de la granulometría, los límites de Atterberg, la clasificación SUCS y la Carta de Plasticidad, se estableció un nivel de riesgo conceptual de inestabilidad para las muestras analizadas, considerando el tipo de suelo predominante en cada plataforma de depósito. Con base en los resultados obtenidos, para la Plataforma 1 se seleccionó la muestra ADR-1 por presentar la condición más desfavorable desde el punto de vista geotécnico. Esta muestra registra un mayor porcentaje de finos y un índice de plasticidad representativo dentro del grupo de limos de baja plasticidad, lo que, sumado a una menor proporción de arena, condiciona un drenaje menos eficiente y un comportamiento más inestable. Dado que las muestras de esta plataforma presentan una clasificación similar (ML), la selección se realizó considerando el contenido de finos y el comportamiento hidráulico como criterios principales. En el caso de la Plataforma 2, se

seleccionó la muestra ADR-4 debido a que presenta la mayor inestabilidad teórica, asociada a un alto contenido de finos y a un mayor índice de plasticidad. Al tratarse de un material clasificado como arcilla de baja plasticidad, su comportamiento hidráulico es marcadamente menos drenante, lo que favorece el desarrollo de presiones de poros y una respuesta geotécnica más desfavorable.

Esta selección permitió enfocar los ensayos de corte directo en las muestras más representativas del rango de estabilidad identificado en la Tabla 5. Adicionalmente, las muestras ADR-1 y ADR-4, seleccionadas para los análisis posteriores, presentan valores de peso específico consistentes con los reportados en la literatura, lo que refuerza su representatividad del comportamiento geotécnico del relave en el área de estudio.

Tabla 5
Potencial de inestabilidad por tipo de suelo

Peligrosidad	Tipo suelo	Justificación	Muestras
Alta	CL (Arcilla)	Baja permeabilidad, casi no drenante, alta	ADR-4, ADR-5
		cohesión	ADR-6
Media	ML (Limos)	Baja cohesión y permeabilidad media,	ADR-1
		condición drenante	ADR-3
Baja	SC (Arenoso)	Mejor drenaje y fricción	ADR-2

3.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica evidenció diferencias claras entre las muestras analizadas. La muestra ADR-1 (limo arenoso) presentó un comportamiento netamente friccional, con cohesión efectiva nula, mientras que la muestra ADR-4 (arcillosa) mostró un comportamiento mixto, con contribuciones comparables de cohesión y fricción a la resistencia al corte. Estos resultados son fundamentales para la comprensión de la estabilidad del depósito y constituyen la base para el modelamiento geotécnico desarrollado en Slide2.

3.2.1. Ensayo de Corte Directo

Los desplazamientos verticales asociados al proceso de consolidación mostraron diferencias entre las muestras analizadas y las condiciones del ensayo. En la muestra ADR-1, los desplazamientos registrados fueron de 1.48 mm, 1.16 mm y 1.63 mm, correspondientes a cada probeta (A, B, C), con tiempos de consolidación de 48 min, 19 min y 15 min, respectivamente. Por su parte, la muestra ADR-4 presentó desplazamientos verticales de 1.12 mm, 1.75 mm y 1.82 mm, correspondiente a cada probeta (A, B, C) con tiempos de consolidación de 30 min, 15 min y 24 min, respectivamente, asociados a niveles de carga vertical del 50 %, 100 % y 200 %, correspondientes a 123, 226 y 433 kPa para la Plataforma 1, y a 116, 213 y 406 kPa para la Plataforma 2. Estos resultados reflejan la influencia de los distintos esfuerzos normales aplicados durante el ensayo y se presentan gráficamente en las Figura 15 y Figura 16 para ambas muestras.

Figura 15

Consolidación log t de la muestra ADR-1

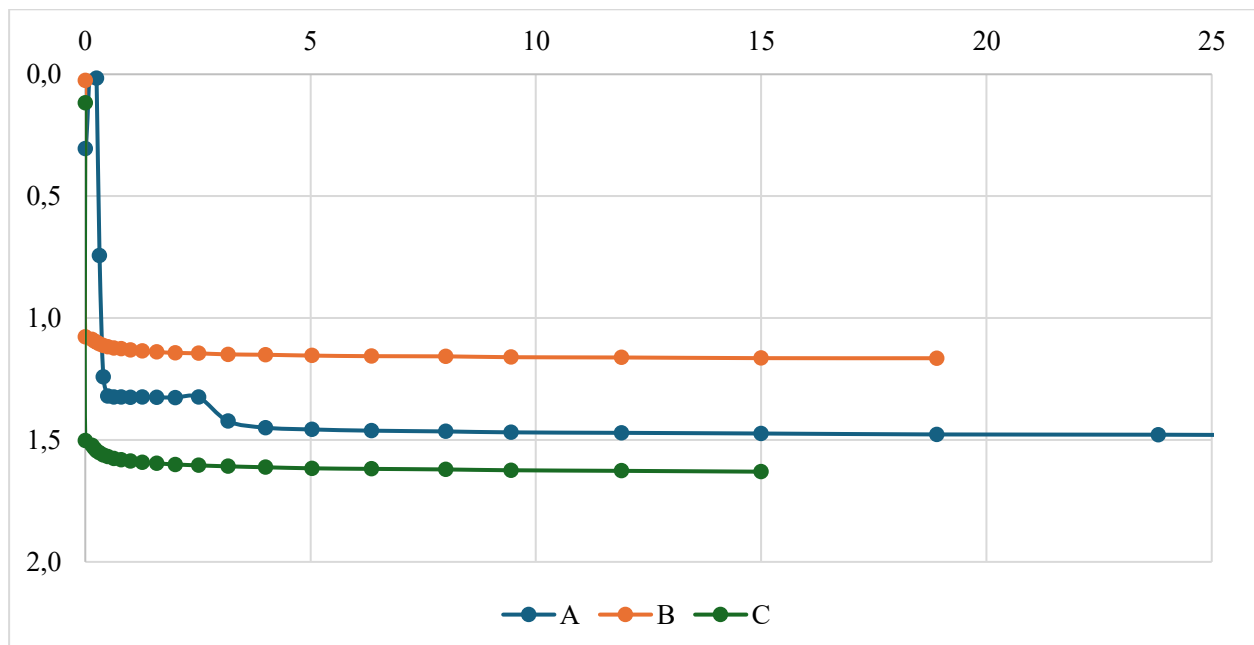
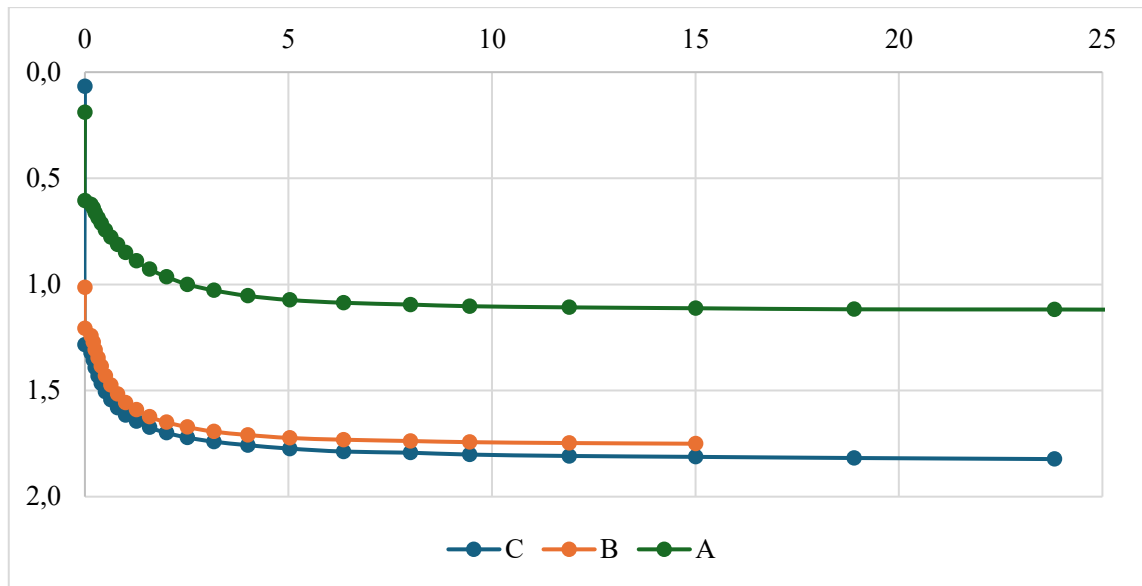


Figura 16
Consolidación log t de la muestra ADR-4



A partir del ensayo de corte directo se determinaron los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de las muestras ADR-1 y ADR-4, mediante la construcción de la envolvente de Mohr Coulomb mostrada en Figura 17 y Figura 18 a partir de los valores máximos de esfuerzo cortante obtenidos para cada nivel de esfuerzo normal aplicado. Las relaciones esfuerzo normal vs esfuerzo cortante mostraron un ajuste lineal satisfactorio en ambos casos, con coeficientes de determinación elevados ($R^2 \approx 0.999$), lo que valida la aplicación del criterio de Mohr–Coulomb.

Figura 17
Envolvente de Mohr Coulomb en la muestra ADR-1, correspondiente a la plataforma 1.

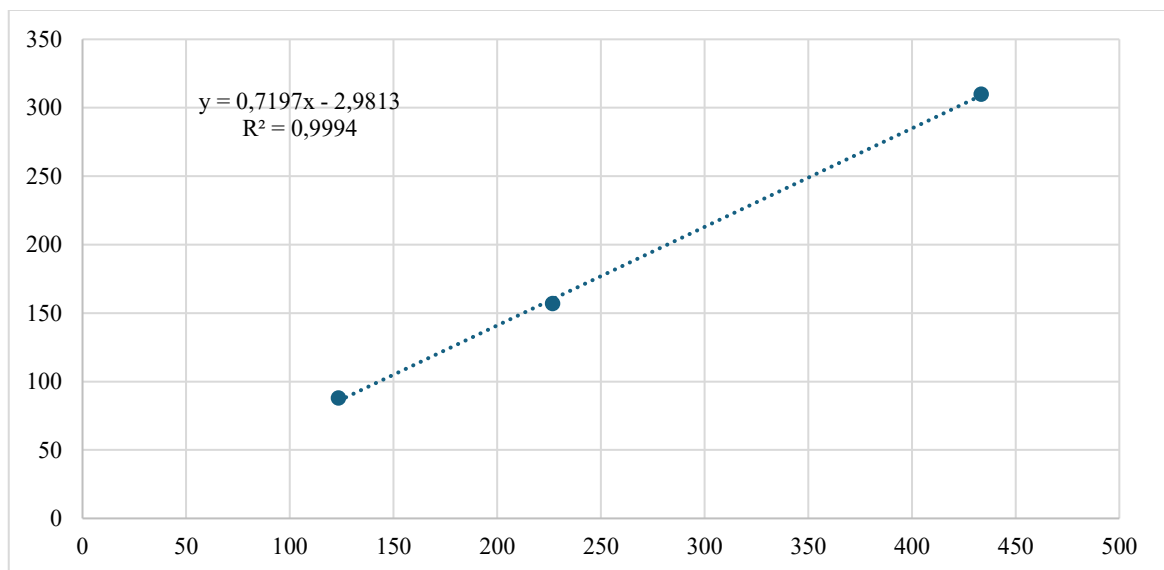
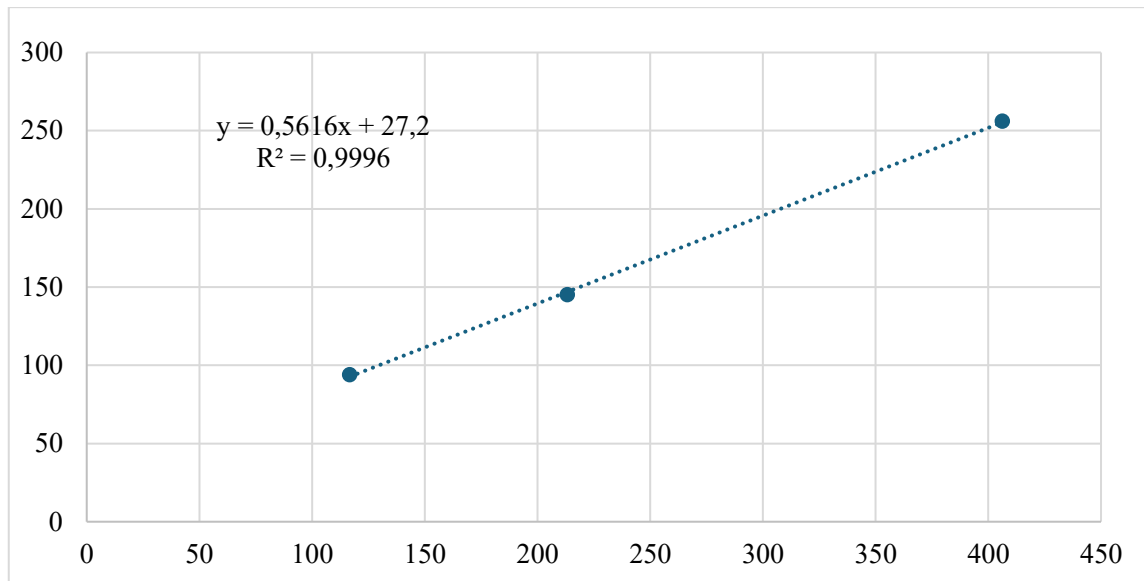


Figura 18

Envolvente de Mohr Coulomb en la muestra ADR-4, correspondiente a la plataforma 2



Para la muestra ADR-1, correspondiente a un suelo clasificado como ML, presente en la plataforma 1, se obtuvo un ángulo de fricción interna de 35.7° y una cohesión aproximadamente nula, evidenciando un comportamiento predominantemente friccional. En contraste, la muestra ADR-4, clasificada como CL, presentó un ángulo de fricción interna de 29.32° y una cohesión de 27.2 kPa, lo que indica una contribución cohesiva significativa al esfuerzo resistente. La comparación entre ambas muestras refleja diferencias claras en el mecanismo de resistencia al corte, asociadas a la clasificación geotécnica y a la distribución granulométrica de cada plataforma. Los resultados de cada muestra se muestran en la Tabla 6, y son representativos del comportamiento mecánico del relave en las dos plataformas de depósito.

Tabla 6

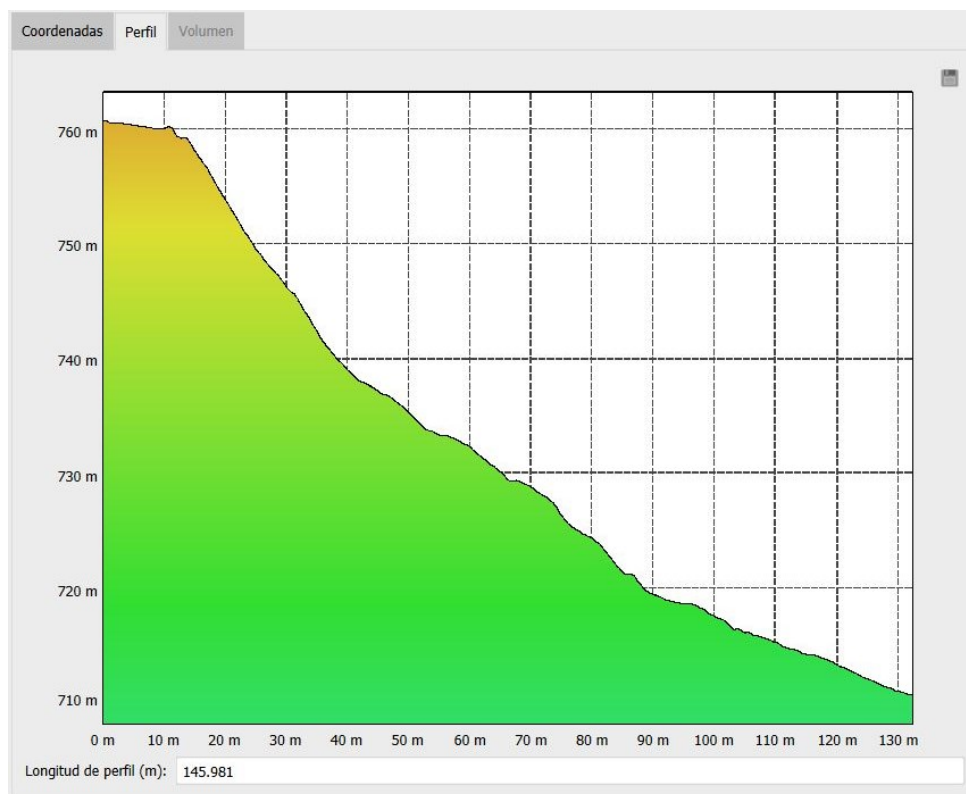
Resultados de los ensayos de corte directo ADR-1 y ADR-4

Mohr Coulomb	ADR-1	ADR-4	Parámetros	ADR-1	ADR-4
τ_{maxA}	88	94	σ_A	123.43	116.65
τ_{maxB}	157	145	σ_B	226.74	213.18
τ_{maxC}	310	256	σ_C	433.36	406.24
ϕ'	35.7	29.32	c'	0	27.2

3.3. Modelamiento geométrico de las plataformas de depósito

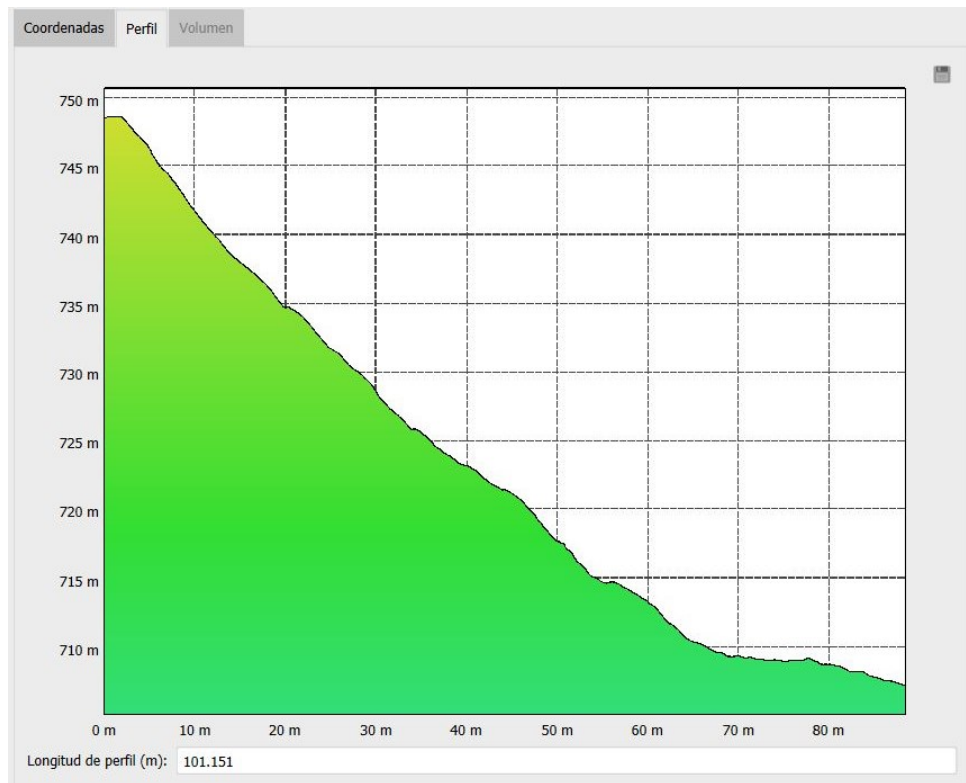
El modelamiento geométrico del depósito permitió definir la configuración espacial de las plataformas de relaves, cuya cota inferior se localiza a 700 m.s.n.m. La plataforma correspondiente a la muestra ADR-1 presenta una altura total aproximada de 60 m, conformada por dos tramos con distintas inclinaciones debido a la disposición del material: un primer tramo de 33 m con un ángulo de 33° , y un segundo tramo de 27 m con una inclinación de 21° respectivamente, la geometría grafica de los perfiles se muestra en la Figura 19.

Figura 19
Perfil de la plataforma de la muestra ADR-1



Por su parte, la plataforma asociada a la muestra ADR-4 alcanza una altura total de 48 m, distribuida en dos tramos con ángulos de 36° y 25° , correspondientes a alturas de 25 m y 23 m, respectivamente, la geometría gráfica de los perfiles se muestra en la Figura 20. Esta geometría constituye la base para el análisis volumétrico y la evaluación de estabilidad del depósito.

Figura 20
Perfil de la plataforma de la muestra ADR-4



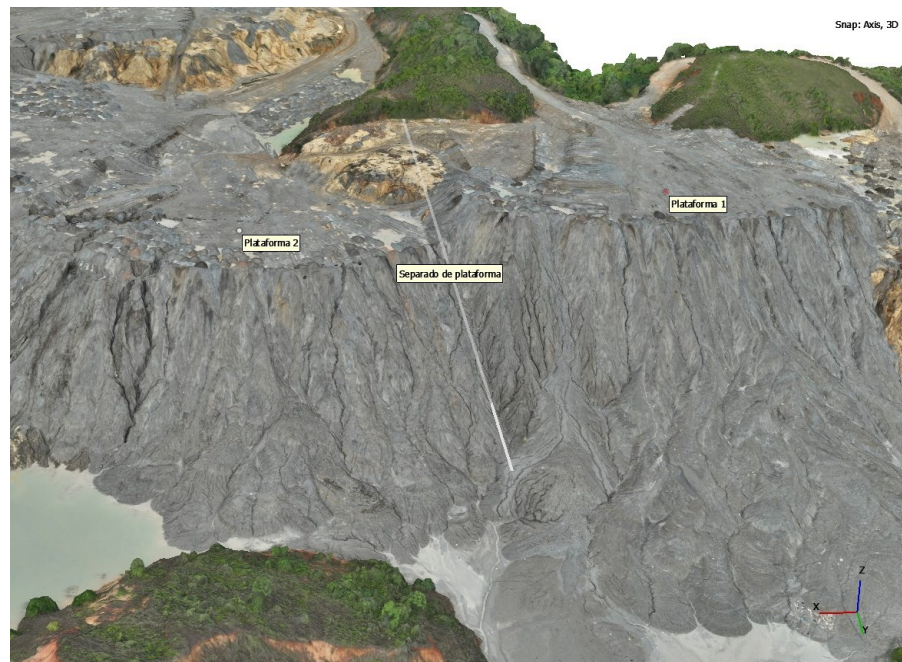
3.3.1. Modelo Fotogramétrico

El modelo fotogramétrico generado permitió obtener una ortofoto actualizada mostrada en la Figura 21 y un modelo tridimensional del depósito en la Figura 22, representando con precisión la geometría real de las plataformas de relaves.

Figura 21
Ortofoto de la Relavera Comunitaria El Tablón



Figura 22
Modelado 3D, de las plataformas 1 y 2 de las muestras ADR-1 y ADR-4



Estos productos reflejan el estado actual de llenado, la continuidad de los taludes y la configuración escalonada del depósito, constituyendo la base geométrica para el cálculo de volúmenes y el análisis de estabilidad. Correspondiente a las fotos, los datos que se puede obtener es un área de 25 hectáreas, además se evidencia presencia de acumulaciones de agua en la base de

cada plataforma lo que indica que el drenaje es natural, pero no existe una extracción de estas aguas a una poza de decantación.

3.3.2. Cálculo volumétrico de las plataformas

A la fecha del levantamiento de la ortofoto (13/01/2026) mostrada en la Figura 23, el volumen total de relaves almacenado en el depósito asciende a 6'561.980 m³. De este volumen, la plataforma 1, correspondiente a la muestra ADR-1, presenta un volumen actual de 817.821 m³, lo que representa el 12.46 % del volumen presente; mientras que la plataforma 2, asociada a la muestra ADR-4, alcanza un volumen de 560.916 m³, equivalente al 8.54 % del volumen actual.

Figura 23

Determinación del volumen de las plataformas 1 y 2 a partir del levantamiento por dron (m³).



3.4. Análisis de estabilidad de las plataformas

El análisis de estabilidad de las plataformas se realizó a partir de los parámetros geotécnicos obtenidos experimentalmente y de la geometría definida mediante el modelamiento fotogramétrico. En el modelo se incorporaron los valores de cohesión efectiva y ángulo de fricción

interna determinados en el ensayo de corte directo, así como la configuración real de los taludes de cada plataforma.

En función de las características geotécnicas identificadas, la plataforma asociada a la muestra ADR-1 fue evaluada bajo condiciones drenadas, mientras que la plataforma correspondiente a la muestra ADR-4 fue analizada bajo condiciones no drenadas, debido a su baja permeabilidad y a la lenta disipación de presiones de poro. Las Figuras 24 y 25 muestran la geometría de los modelos implementados para el análisis de estabilidad.

Figura 24

Modelo de superficie en Slide 2, de la plataforma 1, muestra ADR-1

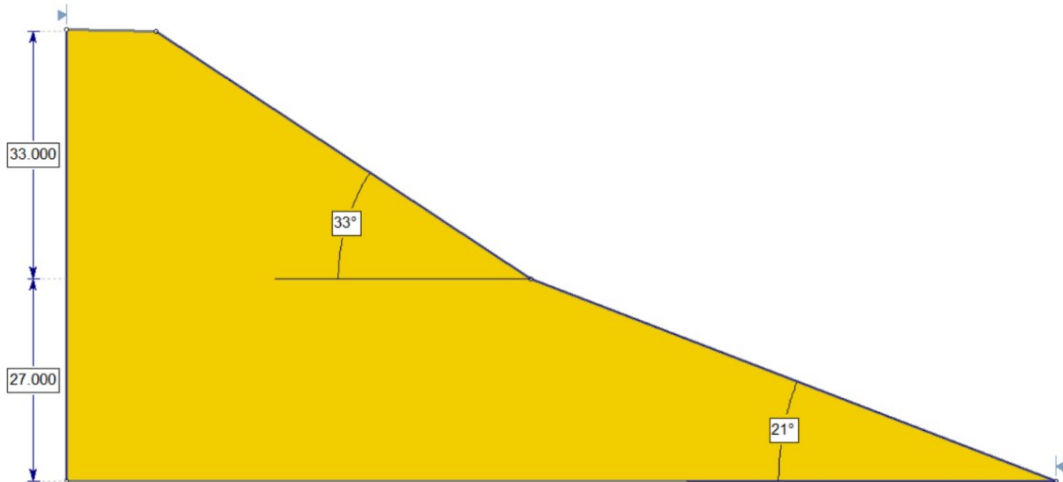
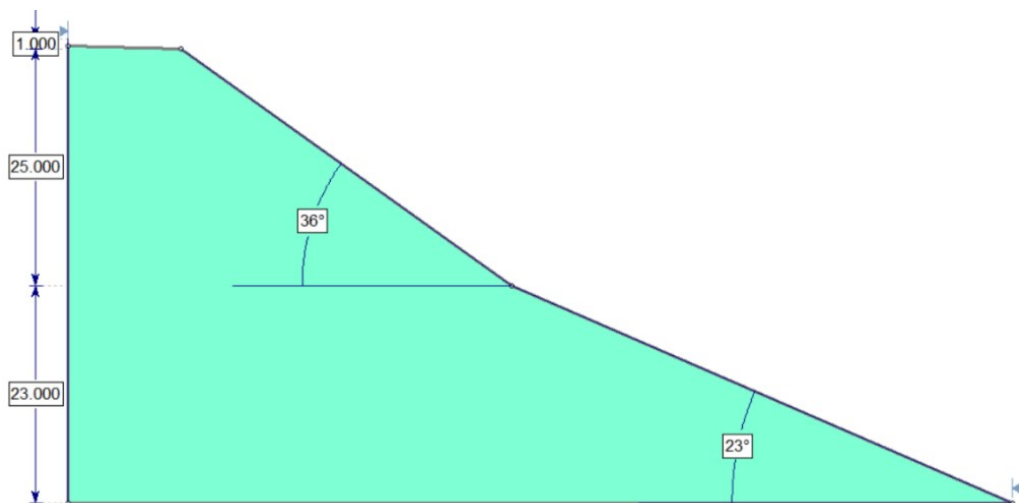


Figura 25

Modelo de superficie en Slide 2, de la plataforma 2, muestra ADR-4

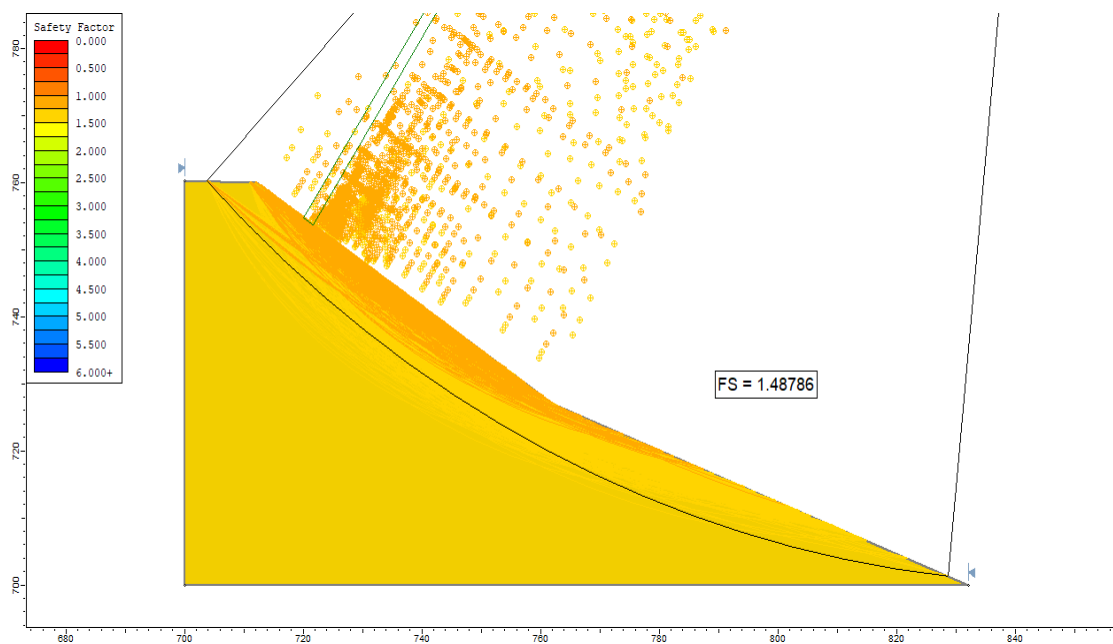


3.4.1. Condición seca y drenado

Bajo condición seca, el análisis de estabilidad de la plataforma ADR-1 arrojó un Factor de Seguridad (FS) de 1.42. Este valor se sitúa por encima del umbral mínimo de estabilidad ($FS > 1.0$), pero por debajo del valor recomendado por normativas internacionales ($FS \geq 1.5$), por lo que la plataforma presenta un estado de estabilidad límite bajo esta condición. La distribución de las superficies críticas de falla y los valores de FS se presentan en la Figura 26.

Figura 26

Modelado de la estabilidad para la plataforma 1 de la muestra ADR-1, en condiciones secas drenadas.

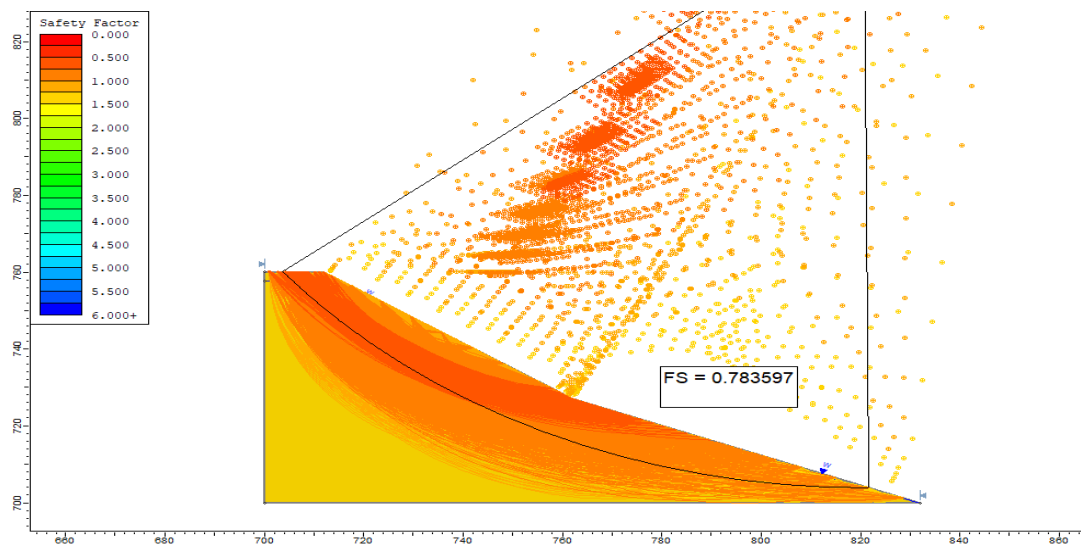


3.4.2. Condición Saturada

Bajo condición saturada, el análisis de estabilidad de la plataforma ADR-1 arrojó un Factor de seguridad (FS) de 0.78, valor inferior tanto al umbral mínimo de estabilidad ($FS > 1.0$) como al criterio recomendado por normativas internacionales ($FS \geq 1.5$), lo que indica un estado inestable de la plataforma bajo esta condición. La distribución de las superficies críticas de falla y los valores de FS se presentan en la Figura 27.

Figura 27

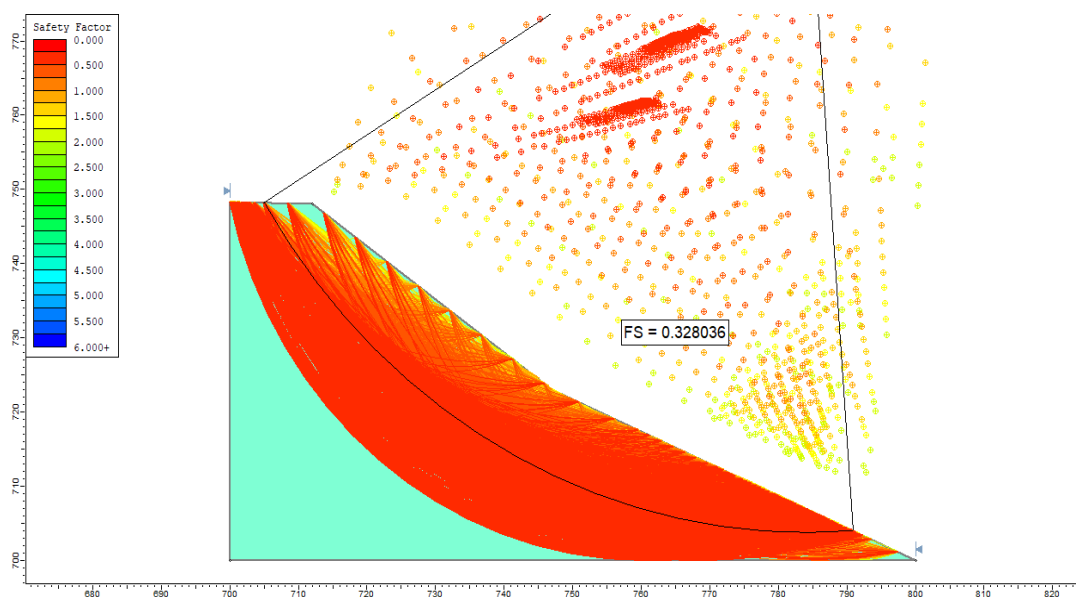
Modelado de la estabilidad para la plataforma 1 de la muestra ADR-1, en condiciones saturadas drenadas.



Mientras que el caso de la plataforma 2, correspondiente a la muestra ADR-4 tiene una particularidad porque al ser en condiciones no drenadas, se sitúa siempre en saturada y se tendrá solo una imagen. Arrojo un Factor de seguridad (FS) de 0.34, valor inferior tanto al umbral mínimo de estabilidad ($FS > 1.0$) como al criterio recomendado por normativas internacionales ($FS \geq 1.5$), lo que indica un estado inestable de la plataforma bajo esta condición. La distribución de las superficies críticas de falla y los valores de FS se presentan en la Figura 28.

Figura 28

Modelado de la estabilidad para la plataforma 2 la muestra ADR-4, en condiciones no drenadas



CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

La metodología aplicada, estructurada en fases de levantamiento geométrico, caracterización físico-mecánica y análisis de estabilidad mediante métodos de equilibrio límite, resultó efectiva para cumplir el objetivo general del estudio. Su aplicación permitió evaluar de manera integral la condición geotécnica de las plataformas de depósito de la Relavera Comunitaria El Tablón, identificando que las plataformas se encuentran críticas en estabilidad, esto es asociado a la disposición actual de los relaves y a la influencia de la saturación. El enfoque metodológico desarrollado demostró ser adecuado no solo para el análisis de estabilidad de las plataformas evaluadas, sino también como una herramienta técnica aplicable a la evaluación de la estabilidad global del depósito, aportando una base confiable para la toma de decisiones en su gestión y operación futura.

El modelamiento geométrico y volumétrico desarrollado permitió cumplir el objetivo de definir la configuración y el grado de llenado de las plataformas de depósito, identificando diferencias significativas entre ellas. La Plataforma 1 alcanza una altura aproximada de 60 m y concentra un volumen de 817.821 m³ (12.46 % del volumen actual), mientras que la Plataforma 2 presenta una altura de 48 m y un volumen de 560.916 m³ (8.54 %).

Los resultados del estudio evidencian que los relaves depositados en la Relavera Comunitaria El Tablón presentan una marcada heterogeneidad geotécnica, reflejada en su composición granulométrica, clasificación SUCS y comportamiento mecánico. La Plataforma 1 está constituida predominantemente por limos arenosos de baja plasticidad, con un 66.65 % de material fino y un comportamiento esencialmente friccionante. En contraste, la Plataforma 2 presenta un alto contenido de materiales arcillosos de baja plasticidad, con un 88.71 % de finos, exhibiendo una respuesta mecánica controlada por la cohesión del material. Estas diferencias

condicionan directamente la resistencia al corte y la respuesta estructural de las plataformas frente a variaciones en el contenido de humedad.

La evaluación geotécnica realizada, basada en los parámetros geotécnicos obtenidos y en la geometría real del depósito, permitió cumplir el objetivo de evaluar la estabilidad de las plataformas de relaves, evidenciando condiciones críticas en ambas. La Plataforma 1, compuesta por limos de comportamiento friccionante y evaluada bajo condiciones drenadas, presenta factores de seguridad de 1.42 en condición seca y 0.78 en condición saturada, valores inferiores a los recomendados por normativas internacionales. Por su parte, la Plataforma 2, constituida por materiales arcillosos y analizada en condición no drenada, registra un factor de seguridad de 0.34, confirmando un estado de inestabilidad. Estos resultados evidencian el alto riesgo asociado a la saturación y a la disposición actual de los relaves.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda, como trabajo futuro, realizar estudios orientados a analizar la influencia de la compactación de los relaves en el comportamiento geotécnico de las plataformas y su incidencia en los parámetros resistentes y en la estabilidad global del depósito. En función de los resultados que se obtengan de dichos estudios, podrían establecerse criterios técnicos que evalúen la factibilidad de implementar medidas de compactación controlada con el fin de mejorar la estabilidad y los factores de seguridad frente a condiciones críticas.

Debido a la marcada heterogeneidad geotécnica observada en los relaves, asociada a la naturaleza comunitaria de la relavera y a la variabilidad del material proveniente de distintas plantas de beneficio y yacimientos, se recomienda ampliar el programa de muestreo en estudios futuros. Este muestreo debería realizarse mediante la extracción de muestras con tubo Shelby, considerando múltiples puntos por plataforma y diferentes profundidades. Esta metodología permitirá evaluar la estratificación progresiva del depósito, diferenciando capas recientes de capas

antiguas que han experimentado consolidación natural por el peso propio del relave, mejorando la representatividad de los parámetros geotécnicos utilizados en los análisis de estabilidad.

Se recomienda implementar un programa de monitoreo periódico del depósito de relaves que permita evaluar la evolución de los desplazamientos y el incremento volumétrico de las plataformas a lo largo del tiempo. Este control puede desarrollarse mediante levantamientos fotogramétricos y el uso de imágenes satelitales procesadas en software especializado, comparando secuencias temporales del llenado del depósito. La aplicación sistemática de esta metodología facilitará el seguimiento del comportamiento geométrico de la relavera, la detección temprana de deformaciones y la actualización continua de los modelos de estabilidad, contribuyendo a una gestión geotécnica preventiva y a la toma de decisiones informadas durante la operación.

Referencias

- Agisoft LLC. (2021). Agisoft Metashape Professional Version 1.7. Rusia: [Software]. Obtenido de <https://www.agisoft.com/>
- American Society for Testing and Materials. (2019). *Annual Book of ASTM Standards: Soils and Rocks*. USA. Obtenido de https://ingenieriaciviltips.blogspot.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos_13.html
- ANCOLD. (2019). Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure. Australia.
- ASTM International. (2007). ASTM D422-63: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/d0422-63r07.html>
- ASTM International. (2010). ASTM D2216-10: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/d2216-10.html>
- ASTM International. (2014). ASTM D854-14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/d0854-14.html>
- ASTM International. (2017). ASTM D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- ASTM International. (2011). ASTM D3080/D3080M-11: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International. Obtenido de https://www.astm.org/d3080_d3080m-11.html
- Beltran, L., Larrahondo, J., & Cobos, D. (2018). Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 44, 0120-3630. doi:<https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- Benjamin, W., & Ward, W. (1 de Abril de 2005). Selfweight consolidation of mixtures of mine waste rock and tailings. (N. R. Press, Ed.) *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 327-339. Obtenido de https://scholar.google.com.co/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=L-Em0L0AAAAJ&citation_for_view=L-Em0L0AAAAJ:u5HHmVD_uO8C

- Blight, G. (2010). *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. South Africa: CRC Press. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/370581703/Geotechnical-Engineering-for-Mine-Waste-Storage-Facilities-pdf>
- Braja, M. D. (2015). *Fundamentos de Ingeniería geotécnica* (Cuarta ed.). Obtenido de <https://bibliotecadigital-espolec.espol.lookproxy.com/reader/fundamentos-de-ingenieria-geotecnica-1703018502?location=4>
- Bravo, C. (10 de Octubre de 2023). Asfalto en la vía de acceso a la Relavera Comunitaria. Portovelo, El Oro, Ecuador. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=do1Z1nUftD8>
- British Standards Institution. (1991). *Métodos de prueba de suelos con fines de ingeniería civil. Ensayos de compresibilidad, permeabilidad y durabilidad*. Londres. Obtenido de <https://trid.trb.org/View/353267>
- Chamorro, R., & Evelin, J. (28 de ene de 2020). Uso de relaves para mejoramiento de suelos por el metodo Compaction Grouting, Pasco. [Tesis de Grado, Universidad Nacional Daniel Alcides]. Obtenido de <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2030>
- Chunhui Zhang, L. Z. (2024). Hydraulic analysis of advanced spillway systems in tailings dams under extreme weather conditions. *Alexandria Engineering Journal*, 109, 1110-0168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.026>.
- Cody Arnold, J. M. (2026). Insights on the cyclic response of plastic and nonplastic mine tailings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 200, 0267-7261. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109814>.
- Das, B. M. (2015). *Principios de Ingeniería Geotécnica* (Octava ed.). California.
- Duncan, J., & Wright, S. (2014). *Soil strength and slope stability* (Segunda ed.). Obtenido de <https://bibliotecadigital-espolec.espol.lookproxy.com/reader/soil-strength-and-slope-stability?location=96>
- Emerman, S. (2019). El potencial de peligro inminente para la vida humana y el medio ambiente de la mina de cobre a cielo abierto Mirador en el sureste de Ecuador. e-tech international. Obtenido de https://etechinternational.org/wp-content/uploads/E-TechInternational_Mirador_Informe_Anexos_CIDH_28Aug2022_esp.pdf
- Esparza Villalta, C. G. (2009). Estudio y diseño de un depósito de relaves para el almacenamiento de relaves del Plan de manejo de las plantas de beneficio en el sector minero Portovelo. [Tesis de Grado, Universidad Técnica Particular de Loja]. Obtenido de <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/14971>

- Flavio Fonseca, L. K. (23 de Julio de 2017). Fallas de la presa de relaves del Fundão: la tragedia ambiental del mayor desastre tecnológico de la minería brasileña en el contexto global. *Perspectives in ecology and consevation*, 15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
- Fourie, A. B., Bligh, G. E., & Papageorgiou, G. (Agosto de 2001). Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 707-719. doi:<https://doi.org/10.1139/t00-112>
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1993). *Unsaturated Soil Mechanics*. New York. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/392767753/1>
- GAD Municipal Portovelo. (2020). *Plan de uso y gestion del suelo canton portovelo*. Portovelo: Gobierno Autono Descentralizado Municipal del Canton Portovelo. Obtenido de <https://www.portovelo.gob.ec/wp-content/uploads/2021/06/PLAN-DE-USO-Y-GESTION-DE-SUELO-CANTON-PORTOVELO-2020-2032.pdf>
- Giseli Modolo Vieira Machado, M. N.-Z. (2025). Beach sensitivity to mining tailings index using a morphodynamic variables approach: case study of the Fundão dam failure (Southeast Brazil). *Regional Studies in Marine Science*, 89, 2352-4855. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104376>.
- Global Tailings Review.org. (2020). *Estandar global de gestion de relaves para la industria minera*. Obtenido de https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
- Gutierrez, A. M. (Julio de 2010). La densidad Aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Sevilla: [Tesis de grado de la Escuela Universitaria de Ingenieria Tecnica Agricola Universidad de Sevilla]. Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Holtz, R. (2011). *Introducción a la ingeniería geotécnica*. Nueva Jersey: Pearson.
- Hunter, M. (2025). *Una Crisis Dorada Minería Ilegal y cadenas de suministro del oro en Ecuador*. Obtenido de <https://oeco.padf.org/wp-content/uploads/2025/07/Marcena-Hunter-Una-crisis-dorada-Mineria-ilegal-y-cadenas-de-suministro-del-oro-en-Ecuador-GI-TOC-junio-de-2025.pdf>
- ICMM. (5 de Agosto de 2020). (International Council on Mining & Metals). *Global Industry Standard on Tailings Management*. Obtenido de <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles/tailings/global-industry-standard-on-tailings-management>

- International, A. (2012). ASTM D698-12e2: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International. Obtenido de <https://www.astm.org/d0698-12e02.html>
- Juarez, B. E. (2005). *Mecanica de Suelos*. Mexico: Limusa.
- Leal, F., Tarle, T., Valera, C., Carvalho de Melo, M., & Sanches, L. (2025). Tailings dam failures in Brazil: River contamination, ecosystem recovery, and institutional responses to the Mariana and Brumadinho disasters. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 47, 2468-5844. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100654>.
- Lobos Chamorro, M. J. (2008). *Efectividad de Biosólidos para la Fitoestabilización de un Tranque de Relaves Minero, en la Comuna de Nogales*. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104997>
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2019). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* (Segunda ed.). Berlin: Gruyter. Obtenido de https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9783110302783_A21563222/preview-9783110302783_A21563222.pdf?ref=ikarus3d.com
- Lumbroso, D. D. (07 de Enero de 2021). Modelling the Brumadinho tailings dam failure, the subsequent loss of life and how it could have been reduced. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 21-37. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-21-21-2021>, 2021.
- Ministerio Ambiente. (29 de Mayo de 2018). Ley de minería. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Ley-de-Mineria.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Agua. (2020). *Plan de Accion Nacional sobre el uso de Mercurio en la Minería Artesanal y pequeña escala*. Machala. Obtenido de https://minamataconvention.org/sites/default/files/documents/national_action_plan/NAP-Ecuador-May2020-ES.pdf
- Ministerio de Energia y Minas. (2021). Boletín Institucional del sector minero. Obtenido de https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/12/A.17-BoletinInstitucionalMinero_Aprobado-signed-signed-comprimido.pdf
- Ministerio de Energia y Minas. (Junio de 2023). Guía Técnica para la presentación de proyectos de diseño de los depósitos de relaves. 3, 14-32. Obtenido de https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/anexo_ii_guia_tecnica_reformada07355120016827308580487558001683231260.pdf

- Ministerio de Energia y Recursos Naturales No Renovables. (2020). Construcción, operación y mantenimiento de depósitos de relaves para la mediana y gran minería. 5-27. Ecuador. Obtenido de <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM-Instructivo-aprobacion-proyectos-relaves-mineria-FIRMADO.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2012). Construcción de la Relavera "El Tablon" en distrito minero Zaruma-Portovelo. Obtenido de https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/19-04-2012_1.docx_.pdf
- Morrill, J. (31 de Marzo de 2025). Una serie de fallas en la presa de relaves muestra la urgencia de poner la seguridad en primer lugar. Obtenido de <https://earthworks.org/blog/a-string-of-tailings-dam-failures-shows-the-urgency-of-putting-safety-first/>
- Núñez, J., Burbano, D., & Jacome, J. (2022). PLAN DEL CIERRE DE LA RELAVERA COMUNITARIA “EL TABLÓN”, PROVINCIA DEL ORO, ECUADOR. *Perfiles*, 1(27), 2477-9105. doi:<https://doi.org/10.47187/perf.v1i27.150>
- Oluranti Agboola, D. E. (2020). A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management. *Results in Engineering*, 8, 2590-1230. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181>.
- Ordoñez, A. (1984). Canchas de relaves de concentradoras mineras. Análisis de estabilidad de presas. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia del Ambiente.
- Poling, G. W., Ellis, D. V., Murray, J. W., Parson, T. R., & Pelletier, C. A. (2002). *Underwater Tailing Placement at Island Copper Mine : A Success Story*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Incorporated.
- Prefectura de El Oro. (15 de Febrero de 2022). Relavera El Tablon. Portovelo, El Oro, Ecuador. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=oy_sKXxC5hI
- Prefectura de El Oro. (15 de Enero de 2024). CONOCE MÁS DEL MODELO DE RELAVERA COMUNITARIA EL TABLÓN [video]. Youtube. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=qoQmX_EgNiI
- Robles, P. V. (2020). *Estado Actual de la minería del oro en Ecuador: gran minería vs minería artesanal*. Manresa: [Tesis de Master de la Universidad Politécnica de Cataluña].
- Rocscience. (2021). *Slide2-Limit Equilibrium Slope Stability Analysis Software*. Obtenido de <https://www.rocscience.com/>
- Rodríguez, R. O. (2009). Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Revista*

Del Instituto De investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas, (12(24)), 7-25. doi:<https://doi.org/10.15381/iigeo.v12i24.351>

- Romero, N. (2020). Plan del cierre de la relavera comunitaria “El Tablón”, ubicada en el sector El Tablón, cantón Portovelo, provincia del Oro. *Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero en Minas. Carrera de Ingeniería en Minas*. Obtenido de <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/6d837480-727d-4e09-a3b7-5be2c9677146>
- SERNAGEOMIN. (2025). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning* (Segunda ed.). New York: CRC Press. Obtenido de https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781498772280_A34054036/preview-9781498772280_A34054036.pdf
- Tavares, V., Souza, G., Brandini, N., Campello, R., Almeida, J., & Duarte, E. (2023). Impacts of a tailings dam failure on water quality in the Doce river: The largest environmental disaster in Brazil. *Journal of Trace Elements and Minerals*, 5, 2773-0506. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2023.100084>
- Terzaghi, K., Peck, R., & Mesri, G. (1967). *Mecánica de suelos aplicada a la ingeniería civil*. New York. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/739351341/Mecanica-de-Suelos-en-La-Ingenieria-Practica-Karl-Terzaghi-y-Realph-B-Peck>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2025). *Sedimentation Investigations of Rivers and Reservoirs*. Washington: Engineer Manual.
- Vallejo, G. d. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: pearson.
- Vlado Vivoda, J. L. (2025). Geopolitics and mine waste: An overview and future research directions. *Journal of Environmental Management*, 385, 0301-4797. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125545>.
- Wickland, B. E., Wilson, G. W., Wijewickreme, D., & Klein, B. (1 de Septiembre de 2006). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. (N. R. Press, Ed.) *Canadian Geotechnical Journal*, 43(9), 928-945. Obtenido de https://scholar.google.com.co/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=L-Em0L0AAAAJ&citation_for_view=L-Em0L0AAAAJ:u-x6o8ySG0sC