

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**



**OPTIMIZACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL INCREMENTO DEL VOLUMEN  
DE ALMACENAMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS  
RAMAHUAYCO (ZONA B), AYACUCHO 2025**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Ochoa Mendoza Jeyson Steve**

**ORCID: 0009-0008-8256-848X**

**Asesor:**

**Dr. Samuel Huaquisto Cáceres**

**ORCID: 0000-0002-9294-6359**

**Para obtener el grado académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**

**TACNA – PERÚ**

**2026**

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
ESCUELA DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Tesis

“OPTIMIZACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL INCREMENTO DEL VOLUMEN  
DE ALMACENAMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS  
RAMAHUAYCO (ZONA B), AYACUCHO 2025”

Presentada por:

Bach. Ochoa Mendoza Jeyson Steve

Tesis sustentada y aprobada el 28 de abril del 2026; ante el siguiente jurado  
examinador:

PRESIDENTE: Dr. Pedro Valerio Maquera Cruz

SECRETARIO: Dr. Genner Alvarito Villarreal Castro

VOCAL: Dr. Diomedes Marcos Martin Oyola Zapata

ASESOR: Dr. Samuel Huaquisto Cáceres

## **DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Yo Jeyson Steve Ochoa Mendoza, en calidad de egresado de la Maestría en ingeniería civil con mención en geotecnia de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 72424796

Soy autor (a) de la tesis titulada:

**OPTIMIZACIÓN GEOTÉCNICA PARA EL INCREMENTO DEL VOLUMEN  
DE ALMACENAMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS  
RAMAHUAYCO (ZONA B), AYACUCHO 2025 DECLARO BAJO  
JURAMENTO**

Con asesor: Dr. Samuel Huaquisto Cáceres

**DECLARO BAJO JURAMENTO**

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 04% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 28 de abril del 2026

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jeyson', with a large, stylized flourish extending from the end of the name.

Nombres y apellidos: Jeyson Steve Ochoa Mendoza

DNI: 72424796

## **DEDICATORIA**

A mis queridos padres, por su amor incondicional y por haberme enseñado, con su ejemplo, la importancia del esfuerzo, la perseverancia y la disciplina que es muy importante en cada paso de mi vida.

A mi esposa, por su apoyo permanente, su comprensión y su paciencia, y por estar a mi lado acompañándome y siempre alentándome durante todo este camino académico, incluso en los momentos más complicados.

A mis hijos, quienes con su alegría y ternura, han sido mi mayor fuente de inspiración y la razón principal para seguir hacia adelante y no rendirme nunca.

A todos ustedes, les dedico este logro con todo mi amor, gratitud y profundo reconocimiento, porque sin su apoyo constante nada de esto habría sido posible.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres por ser mi soporte desde el inicio de mi formación, por sus consejos y por creer siempre en mis capacidades.

A mi esposa, por su comprensión, su motivación permanente y el apoyo que me brindó incluso en los momentos más exigentes de este proceso.

A mis hijos, por su compañía, su ternura y por ser la mayor fuente de inspiración para culminar con éxito esta maestría.

Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor, por su orientación, dedicación y valiosos aportes que enriquecieron significativamente el desarrollo de esta tesis. Su guía fue fundamental para alcanzar los objetivos propuestos.

Gracias a cada uno de ustedes por hacer posible este logro.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO I: EL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	5
1.2.1 Problema principal .....	5
1.2.2 Problemas secundarios .....	6
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	6
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 Objetivo general .....	7
1.4.2 Objetivos específicos .....	7
<b>CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>8</b>
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	8
2.2 NORMATIVA VIGENTE .....	17
2.2.1 Normativa nacional aplicable .....	17
2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS .....	24
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO .....</b>	<b>29</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA	29
3.1.1 Tipo de investigación .....	29
3.1.2 Nivel de investigación .....	29
3.1.3 Justificación del enfoque aplicado .....	30
3.2 DISEÑO DEL PROYECTO .....	30
3.2.1 Etapas del proyecto .....	30
3.2.2 Herramientas y/o software utilizado .....	31
3.3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD .....	32
3.3.1 Análisis geotécnico .....	32
3.3.2 Modelado estructural .....	32
3.3.3 Simulación de impacto ambiental .....	34
3.4 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN.....	37
3.4.1 Cronograma de actividades .....	37
3.4.2 Asignación de recursos .....	38
3.4.3 Costos y financiamiento .....	39
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>40</b>

4.1	DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO .....	40
4.1.2	Levantamiento Topográfico: .....	41
4.1.3	Geología regional y local: .....	41
4.1.4	Geotecnia .....	42
4.1.5	Hidrología.....	58
4.1.6	Sismicidad .....	64
4.1.7	Resultados del modelado.....	71
4.2	ANÁLISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACIÓN CON CASOS SIMILARES.....	72
4.2.1	Análisis del impacto técnico social, económico y ambiental ..	72
4.2.2	Beneficios técnicos, económicos, sociales y científicos .....	73
4.2.3	Comparación con otros estudios o proyectos ya realizados en el ámbito internacional, nacional o local.....	74
4.3	LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS .....	76
4.4	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN .....	78
4.4.1	Plan de implementación de la propuesta geotécnica .....	79
4.4.2	Modelamiento estructural .....	81
4.4.3	Diseño de propuesta .....	83
4.5	EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO.....	85
4.5.1	Costos, inversión inicial, final .....	85
4.5.2	Sostenibilidad .....	86
4.5.3	Viabilidad a largo plazo .....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Matriz Leopold para la simulación del impacto ambiental</i> .....	36
Tabla 2: <i>Cronograma de actividades de ejecución de la investigación.</i> ..	38
Tabla 3 <i>Costos a precios reales de la ejecución de la investigación.</i> .....	39
Tabla 4 <i>Unidades geotécnicas del lugar de estudio.</i> .....	43
Tabla 5 <i>Ubicación de los sondeos MASW y/o MAM.</i> .....	48
Tabla 6 <i>Clasificación sísmica.</i> .....	49
Tabla 7 <i>Relación de calicatas ejecutadas.</i> .....	50
Tabla 8 <i>Ensayos de densidad in situ (cono y arena calibrada).</i> .....	51
Tabla 9 <i>Parámetros índices de las calicatas.</i> .....	55
Tabla 10 <i>Ensayos de gravedad específica.</i> .....	56
Tabla 11 <i>Propiedades de resistencia.</i> .....	56
Tabla 12 <i>Ensayo de conductividad hidráulica.</i> .....	57
Tabla 13 <i>Sondeos ejecutados en la cimentación de la presa y vaso de Ramahuayco.</i> .....	58
Tabla 14 <i>Características de la cuenca Sacclani.</i> .....	60
Tabla 15 <i>Precipitación extrema en estaciones.</i> .....	61
Tabla 16 <i>Precipitación extrema en cuencas.</i> .....	61
Tabla 17 <i>Precipitación extrema en cuencas.</i> .....	62
Tabla 18 <i>Características hidráulicas.</i> .....	63
Tabla 19 <i>Aceleraciones espectrales en roca (T=0.0 seg) diferentes periodos de retorno.</i> .....	66
Tabla 20 <i>Recomendaciones para el cálculo del coeficiente sísmico por distintos autores.</i> .....	66
Tabla 21 <i>Valores de factores de seguridad mínimos admisibles.</i> .....	69
Tabla 22 <i>Propiedades geotécnicas de la presa de relaves para el modelo geotécnico.</i> .....	70
Tabla 23 <i>Factores de seguridad de los depósitos de relaves filtrados (fallas por zonas).</i> .....	70
Tabla 24 <i>Propuesta geotécnica para la ejecución de las etapas 3 y 4 del proyecto.</i> .....	79
Tabla 25 <i>Costos aproximados del proyecto.</i> .....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Ubicación del estudio presa de relaves Ramahuayco.</i>	40
Figura 2	<i>Plano topográfico de vista en planta.</i>	41
Figura 3	<i>Plano geológico de la zona de Ayacucho.</i>	42
Figura 4	<i>Etapas de la operación de la presa.</i>	44
Figura 5	<i>Plano topográfico de vista en sección de la cimentación del depósito de relaves filtrados.</i>	45
Figura 6	<i>Enrocado Ramahuayco – muestra tamizada a mallas convenientes en los laboratorios.</i>	46
Figura 7	<i>Ensayos triaxiales de resistencia del suelo.</i>	47
Figura 8	<i>Perfil de velocidades de corte Vs realizados en el depósito de relaves filtrados Ramahuayco.</i>	49
Figura 9	<i>Análisis estático de la estabilidad del talud de la represa en Slide.</i>	71
Figura 10	<i>Análisis pseudoestático de la estabilidad del talud de la represa en el Slide.</i>	82
Figura 11	<i>Diseño de la propuesta para la ampliación de depósito de relaves.</i>	84

## ÍNDICE DE APÉNDICES

Apéndice 1	<i>Matriz de consistencia del informe final de tesis.</i>	109
Apéndice 2	<i>Diseño Geométrico Planta.</i>	110
Apéndice 3	<i>Diseño Geométrico Sección</i>	111
Apéndice 4	<i>Análisis de laboratorio</i>	112
Apéndice 5	<i>Plano de red de estaciones Senamhi</i>	120
Apéndice 6	<i>Mapa parcial de cuenca de la zona hidrológica - IILA</i>	121
Apéndice 7	<i>Calculo de precipitación máxima probable.</i>	122
Apéndice 8	<i>Comparación entre el Espectro Determinístico (SMC) y los espectros de eventos candidatos seleccionados</i>	123
Apéndice 9	<i>Ajuste Espectral entre el Espectro de Respuesta Determinístico (SMC) y el Espectro del Registro Pisco_2007_15_08/ICA2-090</i>	124
Apéndice 10	<i>Mapa de intensidades en la escala de Mercalli Modificada (MM) del terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007</i>	125

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo optimizar geotécnicamente el diseño del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), ubicado en Ayacucho, con la finalidad de incrementar su volumen de almacenamiento manteniendo condiciones adecuadas de estabilidad física e hidráulica. La problemática surge ante la necesidad de ampliar la capacidad operativa del depósito sin comprometer los factores de seguridad estructural, especialmente bajo condiciones estáticas y sísmicas. El estudio es de tipo aplicado, con enfoque de diseño no experimental–transeccional. Se desarrolló mediante la recopilación de información geológica, geotécnica e hidrológica, complementada con ensayos de laboratorio para la determinación de parámetros de resistencia al corte. El análisis de estabilidad se realizó utilizando el software SLIDE 2D. Asimismo, se evaluó una propuesta de recrecimiento estructural mediante la incorporación de enrocado en las etapas 3 y 4 del proyecto. Los resultados del modelamiento estructural evidencian que la alternativa propuesta permite incrementar el volumen útil del depósito manteniendo factores de seguridad dentro de los rangos aceptables. Se observaron desplazamientos controlados y ausencia de mecanismos de falla global en los escenarios analizados. Se concluye que la optimización geotécnica planteada es técnicamente viable, garantizando estabilidad, seguridad operativa y sostenibilidad a largo plazo del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B).

## PALABRAS CLAVES

Relave, Estabilidad, Talud, Presa, Enrocado

## **ABSTRACT**

This research aims to geotechnically optimize the design of the Ramahuayco filtered tailings storage facility (Zone B), located in Ayacucho, to increase its storage volume while maintaining adequate physical and hydraulic stability. The problem arises from the need to expand the facility's operational capacity without compromising structural safety factors, especially under static and seismic conditions. The study is applied, with a quantitative approach and a non-experimental, cross-sectional design. It was developed through the collection of geological, geotechnical, and hydrological information, complemented by laboratory tests to determine shear strength parameters. Stability analysis was performed using SLIDE 2D software. A proposed structural reinforcement plan was also evaluated, incorporating rockfill in stages 3 and 4 of the project. The structural modeling results demonstrate that the proposed alternative allows for an increase in the usable volume of the storage facility while maintaining safety factors within acceptable ranges. Controlled displacements and the absence of global failure mechanisms were observed in the analyzed scenarios. It is concluded that the proposed geotechnical optimization is technically viable, guaranteeing stability, operational safety and long-term sustainability of the Ramahuayco filtered tailings deposit (Zone B).

## **KEYWORDS**

Tailings, Stability, Slope, Dam, Riprap

## INTRODUCCIÓN

La gestión segura de los depósitos de relaves constituye un aspecto fundamental en la sostenibilidad y continuidad operativa de los proyectos mineros. En este contexto, el presente estudio se centra en la optimización geotécnica del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), ubicado en Ayacucho, con la finalidad de evaluar la viabilidad técnica de incrementar su volumen de almacenamiento mediante un recrecimiento estructural que garantice estabilidad física.

El objetivo general de la investigación es optimizar el diseño geotécnico del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), para permitir el aumento de su capacidad operativa sin perder los factores de seguridad establecidos por la normativa vigente. Por eso, se analizan las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrológicas del área de estudio, así como el funcionamiento estructural del depósito mediante modelamiento especializado.

La investigación plantea y responde a la siguiente pregunta: ¿Es técnicamente viable incrementar el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) manteniendo condiciones mínimas adecuadas de estabilidad y seguridad en escenarios estáticos y sísmicos? Esta pregunta se plantea ante la necesidad de aumentar la vida útil del depósito de relaves sin generar riesgos por fallas estructurales, inestabilidad de taludes o problemas hidráulicos.

La justificación del estudio radica en la importancia de dar seguridad a una gestión responsable de los relaves, optimizando la infraestructura existente antes de considerar nuevas áreas de disposición. La propuesta de recrecimiento estructural, mediante la incorporación de etapas adicionales reforzadas con enrocado, permite analizar una alternativa técnica que suma a la sostenibilidad operativa, reducción de costos y minimización de impactos ambientales en las zonas aledañas.

La presente investigación se estructura en cuatro capítulos, planteados de manera secuencial para desarrollar de forma integral el análisis y la alternativa de optimización del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B).

El Capítulo I contiene el planteamiento del problema, donde se da el alcance técnico y operativo que origina la investigación, así como el cuestionamiento del problema general y los objetivos específicos que orientan el estudio. A su vez, se desarrolla la justificación técnica, económica y ambiental del proyecto, colocando parámetros de su alcance y precisando las variables de análisis relacionadas con estabilidad física y capacidad de almacenamiento.

El Capítulo II contiene el marco teórico y conceptual que presenta la investigación. En este apartado se abordan los principios de mecánica de suelos, comportamiento geomecánico de relaves filtrados, análisis de estabilidad de taludes mediante métodos de equilibrio límite y los criterios de evaluación en condiciones estáticas y pseudoestáticas. También se revisan antecedentes técnicos y lineamientos normativos aplicables a depósitos de relaves, tanto nacionales como internacionales.

El Capítulo III describe el método usado, especificando el tipo y diseño de investigación que se realiza, el enfoque cuantitativo adoptado y los procesos a utilizarse para la recopilación y procesamiento de información geológica, geotécnica e hidrológica. Se mencionan los ensayos de laboratorio realizados para determinar los parámetros de resistencia al corte y las consideraciones tomadas en el modelamiento mediante software SLIDE, especializado para el análisis de estabilidad de taludes.

El Capítulo IV se presentan los resultados obtenidos del análisis geotécnico y del modelamiento estructural. En este capítulo se presenta la propuesta de recrecimiento usando la incorporación de nuevas etapas reforzadas con enrocado, analizando su influencia en la distribución de esfuerzos y desplazamientos.

Finalmente, se presenta las conclusiones derivadas del estudio, alineadas con los objetivos específicos planteados, así como recomendaciones técnicas orientadas a la implementación progresiva del recrecimiento y al monitoreo geotécnico para garantizar la estabilidad y viabilidad a largo plazo del depósito.

# CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la minería contemporánea enfrenta desafíos críticos a escala global en materia de gestión de relaves, especialmente en lo que se refiere a la estabilidad estructural e hidráulica de los diques que los contienen. Eventos de ruptura de presas de relaves, como el desastre de (Morgenstern et al., 2015), evidencian que errores en el diseño geológico y deficiencias en la caracterización de la fundación pueden ocasionar derrames masivos de material contaminado hacia cuerpos hídricos, generando daños ambientales graves (Araya, 2025). De manera similar, la catástrofe de Brumadinho en Brasil, Silva et al. (2020) expuso cómo la licuefacción, la alta permeabilidad no controlada y la acumulación en exceso de presión de poros pueden conducir a fallas súbitas con consecuencias humanas, sociales y ecológicas de magnitud excepcional (France, 2024; Gama et al., 2020; Silva et al., 2020). Estos antecedentes globales marcan la necesidad de modelos más rigurosos, supervisión permanente e innovaciones técnicas en el diseño geotécnico de depósitos de relaves.

En América Latina, se ha promovido la tecnología de relaves filtrados como una alternativa más segura frente a los depósitos húmedos convencionales, debido a su menor contenido de agua libre, mejor compactación y menores riesgos de saturación (Cacciuttolo & Pérez, 2022; Chilon, 2025). No obstante, investigaciones recientes señalan que uno de los principales obstáculos para su adopción generalizada es la capacidad útil de almacenamiento frente al crecimiento operacional, lo que exige estrategias de diseño que aumenten volumen sin sacrificar seguridad física e hidráulica (Ministerio de energía y minas (MINEM), 2013; Aguirre, 2020; Cacciuttolo & Pérez, 2022). Además, la experiencia latinoamericana muestra que, aunque el marco regulatorio y las normas ambientales se fortalecen, los vacíos técnicos persisten en lo que respecta a modelaciones numéricas

comparativas, escenarios extremos (lluvias intensas, sismos), y optimización geométrica del depósito (Cacciuttolo & Pérez, 2022).

En Perú, la minería es esencial para la economía y desarrollo regional, particularmente en zonas de sierra con fuertes presiones ambientales. El Ministerio de Energía y Minas ha presentado nuevas exigencias para el diseño, construcción y operación de depósitos de relaves, incluyendo requisitos geotécnicos, hidráulicos e hidrológicos, así como sistemas de drenaje adecuados para asegurar la estabilidad física del dique y contención del relave (MINEM, 1999).

Por otro lado, el análisis de Impacto Ambiental del proyecto “Depósito de relaves filtrados Yurac Yacu” evidencia que los procesos de aprobación ambiental ya consideran modelos de crecimiento de operaciones mineras, estándares de humedad, compactación y criterios de cierre progresivo; sin embargo, no siempre se detallan alternativas comparativas de diseño o simulaciones bajo escenarios críticos que permitan cuantificar con precisión los márgenes de seguridad hidráulica y física (MINEM, 2013).

En regiones como Ayacucho, la minería tiene una presencia significativa y, al mismo tiempo, enfrenta condiciones geológicas, climáticas y sísmicas que incrementan los riesgos asociados a los depósitos de relaves. En ese contexto, trabajos como Estabilidad física del depósito de relaves filtrados y medidas de control durante la construcción del dique en la Mina Catalina Huanca (Aguirre, 2020) aportan parámetros críticos de diseño, calidad del material, granulometría y control de estabilidad física. No obstante, dicho estudio se centra principalmente en la descripción de condiciones existentes y recomendaciones operativas generales, dejando de lado modelaciones numéricas comparativas o propuestas alternativas con optimización geométrica y de drenaje que exploren posibles incrementos del volumen útil bajo criterios rigurosos de seguridad física e hidráulica (Chávez, 2024).

De otro lado, investigaciones previas en Ramahuayco han desarrollado simulaciones numéricas de su construcción y validación de modelos constitutivos representativos, como los trabajos con modelos elastoplásticos

(Mohr-Coulomb, Cam Clay Modificado, Cap Yield Soil) que comparan los resultados de laboratorio con mediciones reales (Villanueva Jiménez, 2015). Estas simulaciones permiten conocer deformaciones internas bajo etapas de construcción, pero no se extienden a escenarios de expansión operacional futura que impliquen geometrías alternativas, drenajes mejorados, o condiciones de diseño extremo (sismos, lluvias con altos periodos de retorno), para cuantificar hasta dónde puede aumentarse la capacidad manteniendo estabilidad (Huaña, 2015).

El depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), Ayacucho, enfrenta justamente esta necesidad: incrementar su volumen de almacenamiento para soportar operaciones futuras, en un contexto geotécnico, hidráulico y climático desafiante, sin comprometer la estabilidad física ni la hidráulica, considerando infiltraciones, lluvias extremas, variaciones estacionales de humedad, y posible impacto sísmico. Hasta la fecha no se ha encontrado una propuesta detallada que contemple: (i) alternativas geotécnicas comparativas del dique, (ii) modelaciones numéricas bajo diferentes escenarios extremos, (iii) criterios cuantificados de seguridad física e hidráulica adaptados localmente, para estimar cuánto puede extenderse la capacidad sin aumentar riesgos.

Este vacío técnico impide que los responsables de operación, regulación y planificación puedan tomar decisiones fundamentadas acerca de diseños, drenajes, materiales, geometrías o estrategias de mitigación que optimicen capacidad de almacenamiento a un coste seguro. Asimismo, limita la eficiencia operativa, aumenta la incertidumbre regulatoria, podría redundar en mayores costos futuros de mantenimiento, posibles impactos ambientales, riesgo social en caso de falla y posterior pérdida de licencia social.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.2.1 Problema principal

¿Qué alternativa geotécnica permite incrementar de manera segura y eficiente el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados

Ramahuayco (Zona B), garantizando su estabilidad física e hidráulica, Ayacucho 2025?

#### 1.2.2 Problemas secundarios

- ¿Cuáles son las condiciones geológicas y geotécnicas actuales del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) y cómo influyen en la posibilidad de incrementar su volumen de almacenamiento?
- ¿Cómo afectan las condiciones hidrológicas de la zona la estabilidad física del depósito ante escenarios de incremento de volumen?
- ¿Qué alternativa geotécnica presenta el mejor desempeño estructural e hidráulico para incrementar de forma segura el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B)?

#### 1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La presente investigación se realiza porque es importante asegurar la estabilidad de los depósitos de relaves a fin de proteger el medio ambiente frente a la operación y proyección de un incremento en el volumen de relaves generados por las empresas mineras que operan en el lugar, los cuales implican riesgos potenciales si no se evalúan de manera adecuada la topografía, las filtraciones, la capacidad, etc. Además, la investigación se desarrolla para proponer soluciones y alternativas para incrementar de manera segura su capacidad de almacenamiento de relaves, garantizando la sostenibilidad del medio y la integración a las comunidades cercanas, contribuyendo a una gestión minera responsable.

El manejo inadecuado de los relaves mineros tiene consecuencias directas en la calidad de vida de las comunidades cercanas a los depósitos, causando conflictos sociales debido a los riesgos para la salud y la seguridad. En regiones como Ayacucho, donde la minería es un soporte económico fundamental, es crucial proteger a la población local frente a posibles accidentes y contaminación de sus recursos. La implementación de tecnologías modernas y la mejora en la infraestructura de almacenamiento de relaves contribuyen a disminuir estos riesgos, fomentando mucha confianza y fortaleciendo una

relación sana entre la actividad minera y las comunidades locales. De este modo, se impulsa el desarrollo sostenible y se cuida el bienestar social de las comunidades vulnerables.

Los desastres registrados a nivel mundial debido a fallas en presas de relaves evidencian el grave impacto en el medio ambiente que puede causar la liberación de aguas residuales contaminadas y sedimentos, afectando ecosistemas vulnerables y recursos naturales clave, como el agua. En las zonas andinas como Ayacucho, donde las condiciones climáticas y geológicas son complejas, es vital innovar con soluciones geotécnicas eficaces y respetuosas con el entorno para asegurar la estabilidad y capacidad de almacenamiento de los depósitos. Una adecuada gestión ambiental de los relaves aporta al cuidado de la biodiversidad y al uso sostenible de los recursos naturales a largo plazo, encajando con los objetivos globales en materia de sostenibilidad y conservación ambiental.

#### 1.4 OBJETIVOS

##### 1.4.1 Objetivo general

¿Qué alternativa geotécnica permite incrementar de manera segura y eficiente el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), garantizando su estabilidad física e hidráulica, Ayacucho 2025?

##### 1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar los estudios geológicos y geotécnicos de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.
- Analizar los estudios hidrológicos de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.
- Analizar la estabilidad física de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.

## CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

### 2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Zabolotnii et al. (2022), el objetivo principal fue analizar los efectos de estabilidad tridimensional en la pendiente de la instalación. Las variables específicas estudiadas incluyen el debilitamiento por deformación dentro de una banda de corte delgada y la movilización retardada de la resistencia al corte. La población está compuesta por el área afectada del almacenamiento y la muestra es la porción de la pendiente que falló. Se utilizó un análisis de deformación tridimensional como procedimiento metodológico, con simulaciones numéricas que identificaron la banda de corte de 12-13 cm como clave para el inicio del fallo. Los resultados revelaron que la pérdida de confinamiento y la falla por extensión contribuyeron significativamente al colapso. La conclusión principal es que la localización de deformaciones en una banda de corte estrecha es esencial para el inicio de fallos progresivos en esta infraestructura.

Reid & Fourie (2024), este estudio presenta un ejercicio comparativo sobre la estabilidad de taludes de instalaciones de almacenamiento de relaves (TSF), con el objetivo de evaluar la fiabilidad y consistencia de los métodos utilizados por los ingenieros. Se centró en la estabilidad de un talud con una superficie freática ascendente y fue realizado por veintiocho profesionales, quienes realizaron predicciones sobre el nivel en que ocurriría el fallo del talud. Las variables estudiadas fueron las condiciones de la superficie freática y la resistencia al corte de los relaves saturados. La población y muestra incluyeron ingenieros de relaves que analizaron el mismo talud con datos de pruebas de penetración de cono (CPT). El procedimiento metodológico implicó la simulación de un escenario hipotético de TSF con 50 m de altura y una pendiente de 1 V:3 H, con un perfil final de la superficie freática ascendente hasta 77 m. Los resultados mostraron una amplia gama de predicciones de fallos, con algunos ingenieros prediciendo la licuefacción estática y otros utilizando análisis numéricos y relaciones de resistencia al rendimiento. La conclusión principal fue la necesidad de mejorar la consistencia en

los análisis y reconocer mejor los mecanismos de inestabilidad, como la licuefacción estática, en el diseño de TSF.

Łydźba et al. (2024), en el artículo titulado “Reliability-oriented segmentation of sublayers in geologically uncertain substrate: A case study of the Zelazny · Most TSF”. La variable principal del estudio es la variabilidad geotécnica del suelo (parámetros mecánicos y físicos) y su efecto en la confiabilidad del factor de seguridad (FOS). La población corresponde a muestras de suelos del estrato 9n del depósito Żelazny Most, y la muestra está conformada por los ensayos de laboratorio disponibles, seleccionados por proximidad y tipo de prueba. El procedimiento metodológico se basa en análisis estadístico (GMM), reconstrucción espacial por kriging y simulaciones Monte Carlo usando parámetros mecánicos ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $E$ ,  $\gamma$ ,  $\nu$ ). El principal resultado muestra que separar subcapas reduce significativamente la dispersión del FOS. La conclusión central indica que esta segmentación incrementa la confiabilidad estructural del dique, haciendo más precisas las evaluaciones de estabilidad.

Ma et al. (2025), en el artículo titulado “Study on the collapse mechanism of slopes containing weak interlayers due to rising water level”. El estudio analiza las variables contenido de agua del suelo, presión de poros, parámetros de resistencia y estabilidad del talud bajo ascenso rápido del nivel freático. La población corresponde a taludes de riberas de embalses con intercapas débiles, y la muestra se modeló mediante un diseño experimental centrifugado a escala 1:100, considerando como factores el material de la capa débil y como bloque la altura del nivel de agua. El procedimiento metodológico incluyó ensayos de corte directo, construcción de un talud físico en centrifuga, instrumentación con sensores de presión/ desplazamiento y simulación numérica para comparar superficies de falla. El principal resultado mostró que el rápido ascenso del nivel de agua induce licuefacción localizada en el pie del talud, generando grietas transversales y fallas progresivas. La conclusión central indica que la interacción hidromecánica y la saturación de la intercapas débil reducen drásticamente el factor de seguridad, siendo crítico cuando la línea freática supera los 5 m dentro del cuerpo del talud.

Monteiro et al. (2024), el estudio tuvo como propósito analizar el comportamiento físico, mecánico, químico y ecotoxicológico de mezclas compuestas por 90% de ceniza de fondo de incineración (IBA) y 10% de relaves mineros, con el fin de determinar su potencial uso geotécnico. Para ello se evaluaron variables específicas como densidad, granulometría, compresibilidad, resistencia al corte, permeabilidad, pH, concentración de metales pesados y ecotoxicidad. La población incluyó tres tipos de residuos industriales (IBA y dos relaves PAN y MON), mientras que la muestra consistió en dos mezclas 90:10 elaboradas en laboratorio y sometidas a ensayos estandarizados. La metodología empleó pruebas Proctor, edométricas, de corte directo, análisis químicos mediante FAAS y bioensayos con *Aliivibrio fischeri*, utilizando equipamiento especializado como LVDT, compactador Proctor, digestor por microondas y analizadores multiparámetro. Los resultados mostraron que las mezclas conservan un desempeño mecánico similar al de suelos granulares y, además, disminuyen la liberación de metales presentes en los relaves. En conclusión, estas mezclas IBA–relaves presentan estabilidad mecánica y seguridad ambiental, por lo que representan una opción viable y sostenible para su utilización en obras viales.

Khalilzad et al. (2015), el objetivo del estudio es evaluar cómo distintas medidas de rehabilitación reducen la probabilidad de exceder estados límite de desempeño en presas de tierra. Las variables analizadas fueron la deformación horizontal en el pie, el gradiente hidráulico, y la respuesta del talud frente a tres medidas: berma, drenaje y cortina impermeable. La población corresponde a presas de tierra en condición marginal de estabilidad y la muestra se representó con un modelo numérico FEM de una sección típica; los factores experimentales fueron el tipo de remedio aplicado. El procedimiento metodológico empleó modelación geotécnica en PLAXIS, simulación del ascenso del nivel de agua, y análisis probabilístico de excedencia de estados límite mediante el método de Duncan. El principal resultado muestra que la berma de 6 m redujo de manera más significativa la deformación del pie (de 0.23 m a 0.077 m). La conclusión central es que la berma es la medida más

efectiva para disminuir la probabilidad de exceder los estados límite respecto al drenaje o la cortina impermeable.

Cruz et al. (2025), este estudio tiene como objetivo examinar la influencia de las condiciones de moldeo y el tiempo de curado sobre las características mecánicas de los relaves mineros estabilizados con cal. Las variables estudiadas fueron la presión de confinamiento (48-200 kPa), el contenido de cal (6%) y las condiciones de moldeo, con tiempos de curado de 7 a 28 días. La población consistió en muestras de relaves mineros reconstituidos, y se utilizó un diseño experimental con ensayos triaxiales consolidados drenados y no drenados, junto con pruebas edométricas y de permeabilidad. Los instrumentos empleados incluyeron microscopía electrónica de barrido, espectroscopía de dispersión de energía y fluorescencia de rayos X. Los resultados mostraron que los mecanismos de floculación-aglomeración y las reacciones puzolánicas son los responsables de los cambios en la compresibilidad, permeabilidad y la pendiente de las líneas de estado crítico (CSL), siendo la cementación la que mejora la resistencia al corte con el tiempo. La principal conclusión es que la estabilización con cal mejora las características mecánicas de los relaves, especialmente cuando se emplean densidades de moldeo altas.

Zheng et al. (2025), en el estudio titulado “Stability analysis of tailings dams using limit equilibrium and finite element methods”. Las variables estudiadas incluyeron el factor de seguridad obtenido mediante distintas estrategias de búsqueda de superficies de falla y el comportamiento del material tanto en condiciones estáticas de pico como después de la licuefacción. La población se refiere a presas de relaves en funcionamiento, y la muestra fue una presa divisoria seleccionada como caso representativo por la complejidad de su geometría. La metodología combinó análisis de equilibrio límite en Slope/W utilizando múltiples modos de búsqueda con modelación por elementos finitos en Plaxis2D, incorporando parámetros geotécnicos reales y escenarios de licuefacción. Los resultados evidenciaron que ciertos métodos de búsqueda en LE tienden a sobrevalorar el factor de seguridad en comparación con FEM, mientras que la búsqueda totalmente especificada arrojó valores casi equivalentes a los de Plaxis2D, con diferencias mínimas en estado

estático. En síntesis, el enfoque por elementos finitos permite reconocer superficies críticas que los métodos de equilibrio límite pueden no detectar, por lo que su uso conjunto mejora la confiabilidad en la evaluación óptima de la estabilidad de presas de relaves.

Komljenovic et al. (2020), el estudio tuvo como objetivo desarrollar un enfoque integral basado en la resiliencia para gestionar el cierre y abandono de depósitos de relaves mineros, aplicándolo al caso del estanque “Gradina” en la mina de hierro Omarska (Bosnia y Herzegovina). Las variables analizadas incluyeron la estabilidad estructural, riesgos sísmicos e hidrológicos, monitoreo ambiental y desempeño organizacional. La población corresponde a grandes depósitos de relaves y la muestra fue el caso específico de Gradina. El procedimiento metodológico integró análisis de riesgo, evaluación de estabilidad mediante el uso de métodos de equilibrio límite y elementos finitos, revisión normativa e implementación del modelo de resiliencia con cuatro fases: planificación, absorción, recuperación y adaptación. Los resultados mostraron que el riesgo posterior al cierre fue bajo (nivel 3) y que el diseño combinado de clausura seca y húmeda garantizaba estabilidad física y ambiental. Se concluye que el enfoque resiliente permite una gestión sostenible, segura y económicamente viable de los depósitos de relaves clausurados.

Cairo, (2013), esta investigación tiene como objetivo principal evaluar las amenazas geotécnicas y proponer sistemas de contingencia para preservar la estabilidad del depósito de relaves de la Planta Concentradora de Huari. Las principales variables evaluadas fueron las amenazas naturales (sísmicas, geotécnicas e hidrológicas) y antrópicas. La población estudiada incluyó tanto a los trabajadores de la planta como al depósito de relaves, y la muestra fue igual a la población. Se utilizó un enfoque metodológico descriptivo, con recolección de datos a través de encuestas, entrevistas y monitoreos geotécnicos. Los resultados señalaron riesgos significativos, como el deslizamiento de taludes y el debilitamiento de la infraestructura debido a fenómenos sísmicos y geotécnicos. Las conclusiones proponen medidas de mitigación, como la implementación de

sistemas de monitoreo y la capacitación continua para el personal en el manejo de emergencias.

Huaña, (2015), En su tesis titulada “Diseño de Depósitos de Relaves Filtrados”, se describe el proceso integral de diseño y construcción de depósitos de relaves filtrados, analizando el tratamiento, uso y obtención de estos materiales, así como su aplicación como elemento estructural dentro del depósito. Las variables principales son el tipo y tratamiento del relave (independiente) y el diseño, operación y estabilidad del depósito (dependiente), considerando factores como humedad, compactación, topografía y parámetros geotécnicos. La población estuvo conformada por dos unidades mineras peruanas: Ramahuayco (Ayacucho) y Pahuaypite 2 (Ica). La metodología fue descriptiva, analítica y comparativa, con ensayos geotécnicos y diseño estructural conforme a normas nacionales. Los resultados demostraron mayor estabilidad física, menor riesgo ambiental y uso eficiente del agua. Los costos de compactación oscilaron entre 7 y 13.54 dólares por metro cúbico, concluyéndose que esta tecnología es una alternativa moderna, segura y sostenible para la disposición de relaves mineros.

Vilca (2019), esta investigación analiza el comportamiento sísmico de depósitos basados en tecnología de relaves espesados o en pasta (variable independiente) y su efecto sobre la estabilidad física del confinamiento del relave (variable dependiente). Se consideraron variables de control como porcentaje de finos bajo 20  $\mu\text{m}$ , contenido de humedad, densidad no drenada, y resistencia cíclica. La población consistió en muestras de relave de cobre espesado de una planta peruana, con una muestra representativa con 32 % en peso de partículas < 20  $\mu\text{m}$ . El procedimiento metodológico incluyó ensayos triaxiales monótonos y cíclicos no drenados para determinar la resistencia post-licuefacción y estimar el potencial de licuefacción del depósito. Los resultados muestran que la resistencia no drenada es relativamente alta y que la muestra con 53 % de finos presenta susceptibilidad a licuefacción ante fuertes sismos. Se concluye que la tecnología TTD (THICKENED TAILINGS DISPOSAL) mejora la estabilidad física del confinamiento, reduce

riesgos geotécnicos e infiltración, aunque su eficacia depende del contenido de finos y parámetros geotécnicos del material.

Quecaño (2025). Análisis de infiltración y estabilidad del depósito de relaves N° 2 en el recrecimiento del año 2021 – Unidad Minera Huancapetí – Recuay. Las variables analizadas fueron la infiltración, presión de poros y factor de seguridad. La población correspondió a los depósitos de relaves de la Unidad Minera Huancapetí, y la muestra se centró en dos secciones representativas (A-A' y B-B') del dique principal. El procedimiento metodológico incluyó modelación numérica mediante el método de elementos finitos y análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite, considerando condiciones estáticas y pseudoestáticas. Los resultados mostraron que, sin geomembrana, los factores de seguridad fueron de 1.16 y 1.32; mientras que, con revestimiento adecuado, aumentaron a 2.16 y 2.15, confirmando la estabilidad estructural del dique. Se concluye que la incorporación de una geomembrana disminuye la infiltración y eleva la estabilidad física, garantizando la seguridad operativa y la protección ambiental del depósito de relaves.

Rios & Villena (2024), el estudio tuvo como propósito analizar cómo distintas prácticas de conservación influyen en las características físicas del suelo y en su estabilidad. Para ello se consideraron variables como el contenido de humedad, la textura, la densidad aparente, la capacidad de infiltración, la permeabilidad y la estabilidad estructural, todas asociadas al desempeño del suelo. La población estuvo conformada por suelos agrícolas de la zona de estudio, y la muestra se obtuvo mediante calicatas y puntos de muestreo seleccionados según el uso del terreno y su pendiente, sin aplicar un diseño experimental con bloques. La metodología comprendió la toma de muestras superficiales, pruebas granulométricas, determinación de densidad y humedad, mediciones de infiltración en campo y observaciones directas de erosión, utilizando instrumentos básicos como infiltrómetros, balanza, estufa y tamices. Los resultados mostraron que la presencia de cobertura vegetal favorece una mayor infiltración y disminuye la compactación, lo que reduce la susceptibilidad a la erosión. En conjunto, el trabajo concluye que

las técnicas de conservación fortalecen la estabilidad y el desempeño del suelo, contribuyendo a frenar procesos de degradación.

Huaman & Barrios (2024), el objetivo del estudio fue analizar la influencia de la estructura geológica y la litología en la estabilidad del talud propuesto para la presa y el túnel de arranque del proyecto Lluta. Las variables evaluadas fueron la resistencia geomecánica de las unidades rocosas, la orientación de discontinuidades, el grado de meteorización y los esfuerzos inducidos (variables específicas). La población corresponde al macizo rocoso del emplazamiento del proyecto, y la muestra se definió mediante sondeos, mapeo geológico-estructural y clasificación geomecánica, sin un diseño experimental con bloques. El procedimiento metodológico incluyó levantamiento de discontinuidades con brújula geológica, ensayos de laboratorio para propiedades mecánicas, clasificación RMR y análisis de estabilidad mediante métodos empíricos y numéricos, aplicando software de modelación geotécnica. El principal resultado determinó que las unidades litológicas más fracturadas y alteradas condicionan la estabilidad del talud, requiriendo medidas de refuerzo específicas. La conclusión central señala que la caracterización estructural y litológica es determinante para definir el diseño seguro del talud en la presa y el túnel, permitiendo reducir riesgos geotécnicos en la ejecución del proyecto.

El estudio de Gavidia (2023), analiza la actualización de parámetros en el modelamiento geotécnico de un depósito de relaves, con el objetivo de mejorar la precisión de las predicciones numéricas. Las variables consideradas fueron las deformaciones y presiones de poros medidas por prismas y piezómetros (variables específicas). La población corresponde a depósitos de relaves instrumentados, y la muestra fue un depósito particular seleccionado por contar con registros continuos y adecuados para el análisis inverso. El procedimiento metodológico incluyó el uso de modelos constitutivos avanzados en FEM, el análisis de sensibilidad y la aplicación del enfoque de máxima verosimilitud junto con un algoritmo genético, empleando como instrumentos los prismas de deformación y piezómetros instalados en el depósito. El principal resultado indica una mejora de hasta 94% en

la concordancia entre predicciones y mediciones al actualizar el conjunto de parámetros del modelo. La conclusión central sostiene que la integración del monitoreo in situ con análisis inverso reduce significativamente la incertidumbre geotécnica y permite evaluar con mayor seguridad las etapas constructivas del depósito.

Miranda (2024), realizó un estudio cuyo objetivo fue determinar cómo la variabilidad espacial de las propiedades geotécnicas del material del muro influye en la estabilidad estática y pseudoestática de un tranque de relaves. Las variables evaluadas fueron razón de fricción, la resistencia de cono, peso unitario, ángulo de fricción interna, el factor de seguridad y el coeficiente sísmico crítico (variables específicas). La población corresponde a tranques construidos con arenas cicloneadas y la muestra fue un tranque real analizado a partir de múltiples perfiles CPTu obtenidos in situ. La metodología incluyó el procesamiento de ensayos CPTu, la estimación de parámetros mediante correlaciones, el cálculo de escalas de fluctuación y la generación de campos aleatorios, integrados en modelos determinísticos y probabilísticos con Slide2. El resultado principal mostró que incorporar variabilidad espacial permite identificar zonas críticas de baja resistencia y reduce la dispersión en los factores de seguridad y coeficientes sísmicos. La conclusión indica que considerar la heterogeneidad del material mejora significativamente la precisión de los análisis y la confiabilidad del diseño de tranques de relaves.

Contreras (2021), el estudio tuvo como propósito analizar la estabilidad física de un depósito de relaves mediante evaluaciones geotécnicas y simulaciones numéricas que permitieran definir condiciones seguras de operación. Para ello se consideraron variables como la resistencia al corte, la presión de poros, el ángulo de fricción, la cohesión, el factor de seguridad y el comportamiento del talud frente a cargas estáticas y sísmicas. La investigación se centró en depósitos de relaves en funcionamiento, tomando como muestra uno que fue caracterizado mediante sondeos, ensayos de laboratorio y perfiles geotécnicos representativos. La metodología abarcó pruebas físicas y mecánicas, análisis de estabilidad por

equilibrio límite y modelación numérica con parámetros obtenidos del laboratorio y de la estratigrafía del sitio. Los resultados mostraron que, si bien los factores de seguridad cumplen los límites aceptables, existen áreas con mayor vulnerabilidad asociadas a cambios en la resistencia y en el grado de saturación. En síntesis, la combinación de información geotécnica y modelamiento numérico facilita la detección de zonas críticas y contribuye a mejorar el diseño y la gestión del depósito.

Espinoza & Vega (2024), el estudio tuvo como objetivo analizar la estabilidad física del depósito de relaves del Complejo Metalúrgico La Oroya considerando tanto escenarios estáticos como sísmicos. Para ello se evaluaron variables específicas como el factor de seguridad, la resistencia al corte, la presión de poros, las propiedades físicas y mecánicas del material y la configuración geométrica del depósito. La investigación abarcó depósitos de relaves de la zona central del Perú, tomando como caso de estudio el depósito de La Oroya por su importancia y por contar con información geotécnica completa. La metodología incluyó trabajos de campo, ensayos de laboratorio entre ellos granulometría, límites de Atterberg y corte directo, la construcción de perfiles geológicos y la simulación de estabilidad mediante Slide 6.0 en condiciones estáticas y pseudoestáticas. Los resultados indicaron estabilidad adecuada bajo cargas estáticas, pero una disminución del factor de seguridad cuando se consideraron efectos sísmicos. En conclusión, la resistencia no drenada tiene un papel determinante en el comportamiento del depósito, por lo que se recomienda reforzar las estructuras y mantener un sistema de monitoreo permanente.

## 2.2 NORMATIVA VIGENTE

### 2.2.1 Normativa nacional aplicable

- ***Ley N° 31211 – Ley que dispone la adecuación del transporte y disposición final de relave a las empresas que realizan actividades Minero-Metalúrgicas.***

Ley de Adecuación Del Transporte y Disposición Final de Relave a Las Empresas Que Realizan Actividades Minero-Metalúrgicas., (2021), tiene

como finalidad garantizar que las empresas minero-metalúrgicas gestionen de manera segura, eficiente y sostenible los relaves generados en sus operaciones. Para ello, dispone la adecuación obligatoria de los sistemas de transporte y disposición final de relaves a estándares técnicos, ambientales y de seguridad actualizados, priorizando la estabilidad química y física de los depósitos. La norma busca prevenir fallas estructurales, deslizamientos y filtraciones que puedan afectar al medio ambiente o a las poblaciones cercanas. Asimismo, impulsa la modernización tecnológica mediante el uso de métodos más seguros como los relaves espesados o filtrados, que reducen significativamente el contenido de humedad y el riesgo de colapso. La Ley también establece la obligación de elaborar planes de adecuación y monitoreo geotécnico continuo, con el fin de asegurar que las instalaciones cumplan con los factores de seguridad requeridos durante su operación, cierre y postcierre, promoviendo así una gestión responsable y sostenible de los relaves mineros en el país.

- **D.S. N° 031-2023- EM – Reglamento de la ley 31211**

Reglamento de La Ley de Adecuación Del Transporte y Disposición Final de Relave a Las Empresas Que Realizan Actividades Minero-Metalúrgicas., (2023), establece las normas técnicas, ambientales y de seguridad para la adecuación, transporte, disposición final y la gestión integral de relaves generados a consecuencia de las actividades minero-metalúrgicas. Este reglamento indica los criterios de diseño, operación, monitoreo y cierre de los depósitos de relaves, con énfasis en asegurar su estabilidad química y física durante todo el ciclo de la vida de la instalación. Del mismo modo, precisa los procedimientos para la presentación de planes de adecuación, que deben incluir estudios geotécnicos, hidrológicos y de estabilidad, así como la implementación de programas de monitoreo y control que aseguren el cumplimiento de los valores de seguridad exigidos. El D.S. 031-2023-EM también incentiva el uso de tecnologías modernas y sostenibles, como los relaves filtrados, y potencia la responsabilidad del titular minero en la

prevención de riesgos y en el cuidado del medio ambiente, consolidando así un marco normativo técnico que garantiza la seguridad y sostenibilidad en la gestión de relaves en el Perú.

- **D.S. N° 024-2016-EM – Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería**

Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional En Minería, (2016), establece las normas obligatorias para prevenir riesgos y proteger la integridad de los trabajadores, las instalaciones y el medio ambiente en todas las etapas de la actividad en la minera. Este reglamento incluye lineamientos específicos para la seguridad en la construcción, operación y cierre de depósitos de relaves, enfatizando la necesidad de mantener condiciones de estabilidad física y control geotécnico mediante inspecciones, monitoreos y evaluaciones periódicas. Asimismo, demanda la implementación de planes de gestión de riesgos, sistemas de alerta temprana y protocolos de emergencia ante posibles fallas o filtraciones en estructuras de contención. El D.S. 024-2016-EM también incentiva la cultura de prevención, la capacitación del personal en seguridad geotécnica y la responsabilidad del titular minero en buscar instalaciones seguras y sostenibles, fortaleciendo la protección tanto del recurso humano como del entorno donde se desarrollan las operaciones mineras.

- **R.C.D N° 122 – 2024- OS/CD – OSINERGMIN**

R.C.D N° 122 - 2024 - OS/CD, (2021), establece el procedimiento para la presentación de reportes periódicos de las condiciones de los depósitos de relaves, con el objetivo de afianzar la supervisión y control geotécnico de estas instalaciones. Esta norma define la frecuencia, contenido y formato de los informes que deben remitir las empresas mineras, los cuales deben incluir resultados de monitoreos de estabilidad, instrumentación, comportamiento estructural, drenaje y filtraciones, entre otros alineamientos

críticos. Además, dispone que los reportes sean elaborados y firmados por profesionales competentes en geotecnia o ingeniería de minas, asegurando la confiabilidad de la información presentada. La resolución busca asegurar un seguimiento continuo y preventivo de los depósitos de relaves, permitiendo identificar oportunamente condiciones anómalas o riesgos potenciales. De esta manera, afianza la gestión integral de la estabilidad geotécnica y seguridad de las instalaciones mineras en concordancia con las exigencias técnicas y ambientales del marco normativo nacional.

- **Guía de Evaluación de Estabilidad de Taludes**

Guía Ambiental Para La Estabilidad De Taludes De Depositos De Desechos Solidos De Mina, (1997), establece los criterios técnicos y metodológicos para analizar y garantizar la estabilidad de taludes naturales y artificiales en el ámbito minero y geotécnico. Este documento brinda orientaciones sobre la caracterización geológica y geotécnica de materiales, la ubicación de zonas inestables, y la aplicación de métodos de análisis de estabilidad, tanto empíricos como numéricos, incluyendo los métodos de equilibrio límite (Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price) y simulaciones con software especializado. Además, la guía recomienda la implementación de programas de monitoreo geotécnico, uso de instrumentación de control (inclinómetros, piezómetros, etc.) y estrategias de mitigación ante la posibilidad de ocurrir deslizamientos o fallas. Su aplicación permite estandarizar los procedimientos técnicos para evaluar la seguridad de taludes y estructuras de contención, contribuyendo a la prevención de riesgos y a una gestión minera más segura y sostenible.

- **E050 – Suelos y Cimentaciones**

E 050, (2020) - Suelos y Cimentaciones, del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) del Perú, establece los conceptos y procedimientos para la investigación, clasificación y evaluación de suelos y materiales

geotécnicos, así como para el diseño y análisis de cimentaciones y estructuras de contención. Esta norma define los parámetros de exploración geotécnica, ensayos de campo y laboratorio necesarios para determinar propiedades como la resistencia al corte, compresibilidad, permeabilidad y densidad, parámetros esenciales en la evaluación de la estabilidad y capacidad portante del terreno. Asimismo, fija lineamientos para el control de asentamientos, drenaje y comportamiento del suelo ante cargas estáticas o sísmicas. Su aplicación en proyectos de ingeniería geotécnica y minera aseguran la obtención de parámetros confiables para el diseño seguro de estructuras en contacto con el suelo, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad de obras como taludes, presas o depósitos de relaves.

- **NTP 339.150**

Descripción e Identificación de Suelos. Procedimiento Visual - Manual, (2015), basada en la ASTM D4318, establece los procedimientos para la determinación de los límites de consistencia de los suelos finos, específicamente el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad. Estos parámetros permiten analizar el comportamiento del suelo ante cambios de la humedad y son fundamentales para su clasificación geotécnica según su potencial de deformación y plasticidad. La norma describe los métodos de ensayo, equipos requeridos, condiciones de preparación de muestras y criterios de aceptación de resultados, asegurando uniformidad y confiabilidad en los datos obtenidos. Su aplicación es esencial en estudios geotécnicos destinados al diseño y análisis de estabilidad de taludes, cimentaciones o estructuras de contención, ya que los límites de Atterberg ayudan a identificar la susceptibilidad del suelo a cambios volumétricos y pérdida de resistencia, aspectos críticos en la seguridad y desempeño de obras de ingeniería civil y minera.

### **Normas técnicas internacionales de referencia**

Dado que la legislación nacional aún no contempla una normativa específica para relaves filtrados, las empresas mineras y consultoras especializadas

adoptan como referencia normativa documentos internacionales que desarrollan criterios técnicos más avanzados para este tipo de disposición de relaves:

- **Lineamientos Técnicos Estandarizar los procesos relacionados con presas de Relaves.**

Tienen como objetivo unificar los criterios técnicos y operativos aplicables al diseño, construcción, operación, monitoreo, mantenimiento y cierre de las presas o depósitos de relaves en el Perú. Estos lineamientos buscan garantizar que todas las etapas del ciclo de vida de una presa de relaves se ejecuten bajo estándares uniformes de calidad, seguridad y sostenibilidad, reduciendo el cambio de criterios técnicos entre proyectos y fortaleciendo la gestión del riesgo geotécnico. A su vez, promueven la adopción de metodologías actualizadas de evaluación de estabilidad, el uso de instrumentación geotécnica moderna. En conjunto, estos lineamientos contribuyen a garantizar la integridad estructural y ambiental de las presas de relaves, fomentando el trabajo de una gestión responsable, transparente y alineada con las mejores prácticas internacionales en ingeniería de relaves (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

- **Guidelines for Tailings Management - International Council on Mining and Metals**

Constituyen una guía internacional de buenas prácticas para la gestión integral de relaves mineros durante todo su ciclo de vida: diseño, operación, monitoreo, cierre y postcierre. Este documento incentiva un enfoque basado en la gestión del riesgo, la seguridad geotécnica y la protección ambiental, estableciendo puntos fundamentales para asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones de relaves. Las directrices enfatizan la importancia de una gobernanza responsable, el rol del Engineer of Record,

la aplicación de evaluaciones geotécnicas continuas y la integración de la gestión de relaves dentro del sistema general de seguridad minera. Asimismo, fomentan el uso de tecnologías seguras y sostenibles, como los relaves filtrados, y la adecuación de planes de emergencia y comunicación transparente con las comunidades. En conjunto, estas guías afianzan la gestión responsable y la toma de decisiones informadas para reducir el riesgo de fallas e incentivar la sostenibilidad en la ingeniería de relaves a nivel global (International Council of Mining and Metals, 2025).

- **Guidelines on Tailings Dams - ANCOLD**

Publicadas por el Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) son una referencia técnica internacional para el diseño, construcción, operación y cierre de depósitos o presas de relaves. Estas directrices establecen criterios rigurosos de seguridad geotécnica, hidráulica y estructural, promoviendo un enfoque basado en la gestión del riesgo y en la evaluación del desempeño a lo largo del ciclo de vida de la instalación. La guía aborda aspectos esenciales como la caracterización de los materiales de relave y fundación, el control de filtraciones y drenaje interno, la evaluación de estabilidad bajo condiciones estáticas y sísmicas, y la implementación de sistemas de monitoreo e instrumentación para detectar cambios en el comportamiento del depósito. Asimismo, enfatiza la importancia de la revisión técnica independiente y de la documentación continua del diseño y la operación. Su aplicación contribuye a garantizar que las presas de relaves se gestionen con altos estándares de seguridad, confiabilidad y sostenibilidad, alineados con las mejores prácticas de ingeniería internacional (Australian National Committee on Large Dams, 2019).

**Canadian Dam Association (CDA) – Technical Bulletins on Tailings Dams**

Constituyen una de las principales referencias internacionales para la gestión segura y responsable de presas y depósitos de relaves. Estos boletines proporcionan lineamientos técnicos detallados para el diseño, construcción, operación, monitoreo y cierre de instalaciones de relaves, basados en un enfoque de gestión del riesgo y desempeño. Incluyen criterios para la evaluación de estabilidad geotécnica, el control de filtraciones y drenaje, la caracterización de materiales, y la clasificación de presas según sus consecuencias potenciales de falla. Además, destacan la importancia de contar con un Engineer of Record (EoR), revisiones técnicas independientes y sistemas de monitoreo geotécnico e hidrológico que garanticen la integridad estructural a lo largo del tiempo. Los boletines de la CDA promocionan una cultura de seguridad y transparencia, integrando aspectos técnicos, ambientales y sociales, y actúan como guía para aplicar las mejores prácticas internacionales en la gestión de relaves, disminuyendo el riesgo de incidentes y fortaleciendo la sostenibilidad de la industria minera (Canadian Dam Association, 2021).

## 2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

- **Optimización Geotécnica:**

La optimización geotécnica se centra en mejorar el diseño, la seguridad y la eficiencia de infraestructuras como los depósitos de relaves, utilizando tecnologías avanzadas y un análisis exhaustivo del suelo. En el caso de los relaves filtrados, este proceso busca escoger los métodos más óptimo para aumentar la capacidad de almacenamiento (su vida útil), disminuir los riesgos y dar seguridad a la estabilidad del depósito en cada una de las etapas de desarrollo de este proceso de manejo de relaves. Esto se consigue mejorando la compactación de los relaves, eligiendo materiales más resistentes y diseñando de manera innovadora las paredes, bermas y demás componentes. Un enfoque geotécnico adecuado que garantiza que los depósitos puedan soportar más volumen sin poner en riesgo su estructura ni generar impactos negativos en el entorno (Miranda, 2024).

La optimización geotécnica también tiene en cuenta la sostenibilidad por un periodo más largo de los depósitos de relaves. Esto incluye asegurar la estabilidad del depósito frente a deslizamientos, controlar las filtraciones de agua y proteger los recursos hídricos. Para ello, se emplean soluciones como sistemas de drenaje eficientes. De esta forma, no solo se incrementa la capacidad de almacenamiento, sino que también se prioriza la mitigación de riesgos ambientales y la prolongación de la vida útil de infraestructuras mineras (Rios & Villena, 2024).

- **Relave:**

El relave es el residuo sólido y fino resultante del proceso de concentración de minerales, en el cual se separa el mineral valioso del material estéril (Ticse Vila & Jara Rojas, 2022).

Este material está compuesto principalmente por partículas de roca molida y pequeñas cantidades de agua y reactivos del proceso metalúrgico (Castro, 2012).

- **Relave Filtrado:**

El relave filtrado es aquel que ha pasado por un proceso de filtración mecánica, mediante filtros prensa, de disco o banda, para reducir su contenido de agua. El producto obtenido posee una humedad baja (entre 15 % y 25 %), lo que permite su disposición en seco y compactación por capas dentro del depósito (Capone Barraza, 2016).

Este tipo de relave mejora la estabilidad del depósito, permite recuperar agua de proceso y disminuye el riesgo de fallas por licuación o saturación (García Fernández & Gómez Ros, 2015).

- **Depósito de relaves filtrados:**

El depósito de relaves filtrados es una estructura de almacenamiento en seco diseñada para recibir relaves con bajo contenido de humedad. Se compone generalmente de un dique de contención (pedraplén), sistemas de drenaje, control de infiltraciones y zona de compactación (Larenas Mora, 2024).

Su principal ventaja es la mayor estabilidad física en comparación con los depósitos convencionales de relaves en pasta o en estado líquido (B. M. Quecaño Yaja, 2025).

- **Material de préstamo:**

El material de préstamo es el suelo o agregado natural extraído de una zona específica (llamada cantera de préstamo) para ser utilizado en la construcción del dique (Quispe, 2023).

En el contexto de un depósito de relaves filtrados, este material se emplea para conformar las estructuras del dique mezclándose con el relave filtrado a fin de mejorar sus propiedades geotécnicas, como la resistencia al corte y la densidad seca (Quispe Gabriel, 2023).

- **Estabilidad de taludes:**

La estabilidad de taludes se refiere a la capacidad de un talud construido para mantenerse en equilibrio sin sufrir deslizamientos. En un dique de relaves filtrados, depende de la resistencia al corte de los materiales, la geometría del talud, la compactación, el drenaje interno y las condiciones sísmicas (Chávez, 2022). El análisis de estabilidad es primordial para garantizar la seguridad estructural y operativa del depósito.

- **Talud aguas arriba:**

El talud aguas arriba es la superficie inclinada interior del dique, en contacto directo con el relave filtrado depositado. Su estabilidad depende de las propiedades mecánicas del relave y de los materiales de construcción del dique (García Fernández & Gómez Ros, 2015). Durante la operación de la relavera, este talud puede ir incrementando en altura conforme se expande la capacidad de almacenamiento del depósito, por lo que su diseño debe garantizar estabilidad ante cargas estáticas y sísmicas, en cada una de sus etapas.

- **Talud aguas abajo:**

El talud aguas abajo es la pendiente del terreno situada en el lado opuesto a la estructura principal de un depósito de relaves, presa o talud artificial. Este elemento es crucial para la estabilidad de las estructuras de almacenamiento,

ya que un diseño adecuado puede evitar deslizamientos y erosión. Un talud correctamente diseñado distribuye las cargas correctamente y resiste fuerzas como la presión del agua o cambios en la humedad del suelo. La forma del talud debe calcularse con precisión, tomando en cuenta la resistencia del material y las condiciones climáticas, para garantizar que no se debilite bajo situaciones extremas (Soria, 2025).

Además, el talud aguas abajo es esencial para gestionar el drenaje y proteger el medio ambiente. Al estar en contacto con el agua o los relaves, el talud debe manejar el flujo sin que se filtren sustancias hacia el exterior o contaminen el entorno. Para prevenir la erosión, se pueden usar técnicas como la vegetación (en su etapa de cierre), geosintéticos o drenajes subterráneos. Si el talud no está bien diseñado o mantenido, podría causar fallas graves, comprometiendo la seguridad de la estructura y el ecosistema cercano (Padilla & Vilcas, 2024).

- **Incremento del Volumen de Almacenamiento:**

El aumento de la capacidad de almacenamiento en los depósitos de relaves busca incrementar la capacidad de estos sistemas para almacenar más residuos mineros sin afectar su estabilidad ni causar daños al medio ambiente. Para lograrlo, se pueden realizar mejoras en el diseño de las instalaciones, como ajustar las pendientes, optimizar la compactación de los relaves y utilizar tecnologías que permitan almacenar los materiales de manera más densa y segura, cuidando la etapa de operación, con una supervisión constante y rigurosa en el proceso. También es clave gestionar eficientemente el espacio y emplear técnicas de estabilización del suelo para asegurar que el aumento de la capacidad no eleve el riesgo de fallas, deslizamientos o contaminación (Rojas, 2021).

- **Análisis Geotécnico:**

El análisis geotécnico es un estudio de las características del suelo y los materiales que componen estructuras como los depósitos de relaves, con el fin de asegurar su estabilidad y seguridad. Este análisis involucra la recopilación de información sobre la resistencia del suelo, su capacidad para

soportar cargas y su comportamiento bajo diferentes condiciones, como humedad y temperatura. Con estos datos, se pueden hacer recomendaciones sobre cómo diseñar las estructuras de manera que se eviten problemas como deslizamientos o fallas. Un análisis geotécnico detallado es crucial para anticipar problemas durante la construcción o a largo plazo (Chávez, 2022). Además, el análisis geotécnico también aporta a identificar posibles riesgos ambientales al construir en ciertos terrenos. Al entender la composición y el comportamiento del suelo, es posible analizar cómo la construcción podría afectar el entorno, como filtraciones de contaminantes hacia fuentes de agua cercanas o el riesgo de erosión. También permite valorar la efectividad de métodos de estabilización del suelo que se está obteniendo, como el uso de barreras impermeabilizantes o sistemas de drenaje. De esta manera, el análisis geotécnico no solo asegura la seguridad de las estructuras, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental del proyecto (C. Espinoza, 2025).

- **Manejo de Filtraciones:**

El manejo de filtraciones es fundamental en la gestión de depósitos de relaves, ya que estas filtraciones pueden afectar la estabilidad de la estructura y causar daños al medio ambiente, si no se hace un correcto manejo de las aguas contaminadas. Las filtraciones suceden cuando el agua o los líquidos de los relaves atraviesan el material, lo que puede saturar el suelo y generar deslizamientos o colapsos. Para prevenir esto, se utilizan técnicas como sistemas de drenaje que dirigen el agua hacia zonas seguras y barreras impermeables que evitan que el agua penetre en las capas más profundas del depósito. Un manejo eficaz de las filtraciones no solo asegura la estabilidad del depósito, sino que también protege los cuerpos de agua cercanos y reduce el riesgo de contaminación ambiental (Muñoz, 2024).

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y DISEÑO DEL PROYECTO**

### **3.1 DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN APLICADA**

#### **3.1.1 Tipo de investigación**

La presente investigación es de tipo no experimental, debido a que no se manipulan deliberadamente las variables del estudio, sino que se analizan tal como se presentan en el depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B). El investigador observa, describe y evalúa las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrológicas existentes, así como los comportamientos estructurales del dique bajo diferentes escenarios de modelación.

Asimismo, el estudio adopta un enfoque de investigación cuantitativo, ya que se orienta en la recolección de datos numéricos provenientes de ensayos de laboratorio (granulometría, densidad seca), mediciones topográficas, parámetros geomecánicos y resultados obtenidos mediante modelaciones geotécnicas. Esta información es procesada estadística y analíticamente para obtener indicadores de estabilidad, factores de seguridad y variaciones volumétricas del depósito.

El diseño es no experimental – transeccional, dado que los datos se recolectan en un único momento o periodo específico y se analizan para describir las condiciones actuales del depósito y evaluar alternativas geotécnicas para incrementar su volumen de almacenamiento.

#### **3.1.2 Nivel de investigación**

La presente investigación es de nivel aplicada, orientada a la optimización geotécnica del diseño del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), con propósito de incrementar el volumen de almacenamiento manteniendo los niveles de seguridad y estabilidad exigidos por la normativa vigente.

El estudio contempla el análisis geotécnico y estructural del dique de contención, teniendo en cuenta la interacción entre el relave filtrado y el

material de préstamo utilizado en su conformación. Se busca establecer parámetros óptimos de densidad seca, resistencia al corte y geometría de taludes, que apoyen a lograr un diseño más eficiente y sostenible.

### **3.1.3 Justificación del enfoque aplicado**

El enfoque que se le da a la investigación es cuantitativo, debido a que el problema planteado exige una evaluación objetiva, medible y verificable de los parámetros geotécnicos, hidrológicos y estructurales involucrados en el diseño del depósito de relaves filtrados. La optimización del volumen de almacenamiento requiere considerar numéricamente variables como la densidad seca, la humedad, la cohesión, el ángulo de fricción, el nivel freático, las presiones de poros y los factores de seguridad de los taludes.

Este enfoque nos deja utilizar métodos analíticos y herramientas de modelación computacional (como SLIDE 2D y Civil 3D) para modelar escenarios de incremento de volumen y poner a prueba su desempeño físico e hidráulico bajo condiciones estáticas y sísmicas. Al trabajar con datos numéricos, se asegura que las conclusiones y recomendaciones se sustenten en valores exactos, reproducibles y comparables.

Asimismo, el enfoque cuantitativo es coherente con los objetivos específicos del estudio, que necesitan obtener resultados medibles para determinar la alternativa geotécnica más eficiente y segura para incrementar el volumen de almacenamiento del depósito Ramahuayco (Zona B).

## **3.2 DISEÑO DEL PROYECTO**

### **3.2.1 Etapas del proyecto**

- **Etapas 1: Levantamiento de información y caracterización del sitio**
  - Revisión de planos, estudios geotécnicos y reportes previos del depósito Ramahuayco.

- Toma de muestras de relave filtrado y material de préstamo.
- Ensayos de laboratorio: límites de Atterberg, granulometría, densidad seca, humedad óptima, CBR y resistencia al corte (triaxial o corte directo).
- Levantamiento topográfico.
- **Etapa 2: Análisis geotécnico y diseño preliminar del dique**
- Alcance de parámetros de resistencia y deformabilidad de los materiales.
- Cálculo del factor de seguridad para taludes aguas arriba y aguas abajo.
- Estimación del volumen de almacenamiento actual.
- **Etapa 3: Optimización y validación de resultados**
- Identificación del modelo con mayor volumen útil y estabilidad aceptable.
- Análisis comparativo de alternativas.
- Formulación de recomendaciones de diseño y operación segura.

### **3.2.2 Herramientas y/o software utilizado**

Para el desarrollo del análisis geotécnico se utilizarán las siguientes herramientas:

- SLIDE 2D para el análisis de estabilidad de taludes usando métodos de equilibrio límite (Spencer).
- AutoCAD Civil 3D: para el diseño geométrico del dique, generación de planos topográficos y perfiles.
- Excel: para cálculos, tabulación de resultados y análisis de filtraciones.
- Equipos de laboratorio geotécnico: horno, moldes Proctor, triaxial, y equipo de corte directo para obtención de parámetros de resistencia.

### 3.3 EVALUACIÓN TÉCNICA Y FACTIBILIDAD

#### 3.3.1 Análisis geotécnico

La evaluación técnica se realizará verificando los resultados obtenidos para el diseño del depósito optimizado obtenido mediante simulaciones geotécnicas, considerando los siguientes criterios:

- Factor de seguridad de los taludes aguas arriba y aguas abajo bajo condiciones estáticas y sísmicas.
- Incremento porcentual del volumen de almacenamiento logrado con el nuevo diseño.
- Cumplimiento de la normativa peruana vigente (RNE – Norma E.030, E.050 y E.020 D.S. 024-2016-EM).

Asimismo, se evaluará la factibilidad técnica y operativa en función de la disponibilidad de materiales de préstamo, la tecnología de filtrado empleada y la viabilidad constructiva del diseño.

#### 3.3.2 Modelado estructural

El modelado estructural del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) se desarrollará siguiendo los lineamientos metodológicos referidos a la representación geométrica, verificación estructural y análisis sísmico de la solución propuesta. El modelado tiene como finalidad evaluar el comportamiento del dique de contención ante cargas estáticas, dinámicas e hidrológicas, y validar que la alternativa geotécnica seleccionada permita incrementar el volumen de almacenamiento sin comprometer la estabilidad física ni hidráulica del depósito.

El procedimiento adoptado para el modelado se estructura en las siguientes fases:

- a) Definición de la geometría del dique optimizado:

Se construirá un modelo bidimensional en corte transversal representativo del depósito, incorporando:

- Altura actual y proyectada del recrecimiento.
- Pendientes propuestas para taludes aguas arriba y aguas abajo.
- Bermas intermedias y ancho del coronamiento.
- Zonas de compactación del relave filtrado.
- Capa de fundación y estratigrafía del terreno natural.

Para ello se empleará AutoCAD Civil 3D, realizando perfiles y secciones que serán importados al software de análisis geotécnico.

b) Asignación de parámetros geotécnicos:

Los parámetros estructurales se obtendrán de:

- Ensayos de laboratorio (triaxial, corte directo, Proctor).
- Estudios geológicos existentes.
- Resultados de densidad seca y humedad óptima del relave filtrado.
- Valores recomendados de diseño según normativa (RNE E-050 – ICMM).

Se considerarán parámetros como:

- Cohesión ( $c$ ).
- Ángulo de fricción interna ( $\phi$ ).
- Peso unitario seco y húmedo.
- Módulo de deformación.
- Presiones de poros estimadas.

c) Construcción del modelo en SLIDE 2D:

El análisis se realizará con el método de equilibrio límite Spencer, recomendando por la CDA y ampliamente utilizado para depósitos de relaves filtrados.

El modelo permitirá evaluar:

- Estabilidad del talud aguas arriba.
- Estabilidad del talud aguas abajo.
- Condiciones estáticas y sísmicas.
- Desplazamientos potenciales.

d) Análisis sísmico

- Se aplicará un análisis pseudoestático considerando:
- Aceleración horizontal según el Mapa de Zonificación Sísmica del Perú (RNE E-030).
- Factores de sismicidad propios de la región Ayacucho.
- Ensayo de sensibilidad ante variaciones del coeficiente sísmico (0.10 – 0.25 g).

Se verificará que el factor de seguridad estático y dinámico ( $FS \geq 1.5$  y  $FSe \geq 1.25$ ) de acuerdo al RNE CE 020 Suelos y Taludes, cumpla con los criterios internacionales y nacionales para depósitos de relaves filtrados.

El modelo estructural será presentado mediante figuras, perfiles y mapas de tensiones generados en AutoCAD Civil 3D y SLIDE 2D.

### **3.3.3 Simulación de impacto ambiental**

La simulación del impacto ambiental se desarrolla considerando los efectos derivados de la optimización geotécnica del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) y los cambios en su comportamiento físico e hidráulico tras el incremento de volumen propuesto. La evaluación integra

criterios del D.S. 040-2014-EM, la Ley N.º 28271, y el D.S. 024-2016-EM, alineándose con lo establecido en el punto 5.3 del Plan de Investigación respecto a la identificación, valoración y representación matricial de impactos ambientales.

a) Mejora de estabilidad física y reducción de riesgos

La optimización geotécnica permite aumentar la estabilidad del dique de contención, lo que reduce significativamente el riesgo de deslizamientos, fallas geotécnicas y filtraciones. Estos riesgos —de naturaleza física y potencialmente ambiental— constituyen factores críticos para la protección de la calidad del agua y del suelo en el entorno inmediato. La modelación geotécnica realizada muestra una disminución del potencial de colapso del talud, lo cual se traduce en un menor riesgo de dispersión de partículas contaminantes o generación de zonas erosionadas.

b) Reducción del consumo de agua y control hídrico

El uso de relaves filtrados favorece la recuperación y recirculación del agua industrial, reduciendo la extracción desde fuentes naturales y contribuyendo a una gestión sostenible del recurso hídrico. Los relaves con menor humedad generan menores tasas de infiltración y requieren menos agua para su transporte y conformación, lo que disminuye indirectamente la presión sobre cuerpos hídricos cercanos.

c) Minimización de formación de lixiviados y presiones de poros

La mejora del sistema de drenaje y la compactación del material reducen la presión de poros, condición determinante para mitigar la formación de lixiviados y la migración de metales potencialmente contaminantes. Estas mejoras reducen el impacto negativo sobre la calidad de agua subterránea y superficial, asegurando un comportamiento hidráulico más estable del depósito.

d) Disposición en seco y facilidades para el cierre

La disposición en seco de los relaves facilita la rehabilitación progresiva del terreno mediante procesos de revegetación y gestión paisajística. Esto es coherente con los lineamientos de la Ley N.º 28271 (Cierre de Minas), que exige garantizar la estabilidad química y física de los componentes mineros en el post-cierre. La menor humedad del relave contribuye a un cierre más seguro, estable y sostenible.

e) Integración con la simulación de impactos (metodología tipo Leopold)

La evaluación de impactos ambientales se desarrolló mediante la aplicación de la Matriz Leopold, herramienta que permite identificar, valorar y analizar las interacciones entre los procesos del proyecto y los componentes del medio ambiente. Para este estudio, la matriz se presenta con valores estimados de Magnitud (M: 0–10) e Importancia (I: 0–10) para cada interacción significativa, acompañados de una justificación técnica, las medidas de mitigación propuestas y la valoración del impacto residual (M/I) luego de aplicadas dichas medidas. Esta metodología facilita una apreciación integral y comparativa del comportamiento ambiental del depósito optimizado, permitiendo priorizar los impactos más relevantes y orientar la toma de decisiones hacia una gestión ambiental responsable y sostenible.

**Tabla 1**

*Matriz Leopold para la simulación del impacto ambiental*

Acción / Componente	Suelo (M/I) y justif.	Agua sup. (M/I) y justif.	Aire (M/I)	Flora (M/I)	Fauna (M/I)	Medidas de mitigación (resumen)
<b>A. Mov. de tierra / preparación</b>	7 / 6. Justif.: corte/llenos y compactación afectan estructura y erosión superficial.	5 / 5. Justif.: escorrentía y sedimentación durante lluvias.	4 / 3. Polvo de desbroce.	5 / 5. Pérdida de cobertura vegetal local.	5 / 5. Perturbación hábitat por maquinaria.	Barreras de sedimentos, geomantas, cronograma fuera de temporada de lluvias, riego puntual para polvo, restauración de taludes.

<b>B. Construcción bermas y contención</b>	6 / 6. Justif.: compactaciones localizadas y uso de préstamo.	5 / 6. Justif.: modificaciones de drenaje superficial.	3 / 2. Menor emisión.	4 / 4. Eliminación de parches vegetales.	4 / 4. Disturbio en fauna local.	Control de escorrentías, diseño de pendientes seguras, extracción controlada de préstamo, plan de restauración de cantera.
<b>C. Extracción / cantera de préstamo</b>	7 / 7. Justif.: remoción extensiva de material; riesgo de erosión en cantera.	4 / 4. Escorrentías locales desde cantera.	4 / 4. Polvo de extracción.	6 / 6. Pérdida de vegetación en cantera.	5 / 5. Perturbación hábitat.	Selección alternativa de cantera, restauración progresiva, control de polvos, sistemas de escorrentía en cantera.
<b>D. Transporte (camiones)</b>	4 / 4. Compactación en vías.	3 / 3. Escorrentía de calzadas.	5 / 4. Emisión de polvo y gases.	3 / 3. Perturbación marginal.	3 / 3. Perturbación por tráfico.	Rutas definidas, horarios restringidos, limpieza de carga, mantenimiento de vehículos, barreras vegetales contra polvo, estabilización de caminos.
<b>E. Operación: depositación y compactación</b>	5 / 4. Compactación controlada limita erosión; alteración de perfiles.	6 / 6. Riesgo de escorrentía contaminada si no hay control.	3 / 2. Emisión menor (relaves filtrados).	4 / 4. Zona de depósito reduce hábitat local.	4 / 4. Fauna desplazada.	Monitoreo piezométrico continuo, drenaje bien dimensionado, control de humedad y compactación por capas, protocolos de inspección diaria.
<b>F. Mantenimiento y recrecimientos</b>	6 / 5. Acciones repetidas generan compactación y alteración del terreno.	5 / 5. Mantenimiento puede generar sedimentación.	3 / 2. Emisión mínima con buen control.	4 / 4. Intervenciones continuas retrasan recuperación vegetal.	4 / 4. Perturbación reiterada.	Protocolo de control de calidad (compactación), inspecciones frecuentes, programas de revegetación en bermas no operativas.
<b>G. Drenaje y obras hidráulicas</b>	5 / 5. Excavaciones localizadas; posible erosión.	7 / 8. Alteración significativa de escorrentías; positivo si bien diseñado.	2 / 1. Poca emisión.	3 / 3. Intervención riparia limitada.	3 / 3. Fauna asociada a corrientes afecta marginalmente.	Diseño sobredimensionado, sedimentadores, filtros, mantenimiento periódico, sistemas de alivio para eventos extremos.
<b>H. Emisiones atmosféricas (polvo)</b>	4 / 4. Depósito y obras generan polvo localizado.	2 / 2. Poca efecto directo sobre cuerpos de agua si controlado.	6 / 5. Emisión (polvo) relevante en temporadas secas.	3 / 3. Afecta vegetación por deposición de polvo.	3 / 3. Afecta fauna sensible.	Riegos periódicos en caminos, coberturas temporales, control fuentes de polvo, barreras vegetales.
<b>I. Lixiviados y efluentes</b>	6 / 6. Riesgo de contaminación puntual si hay filtración.	8 / 9. Alto riesgo si drenes fallan -> contaminación superficial.	2 / 2. Poca efecto aire.	6 / 6. Riesgo de afectar vegetación por alteración química.	6 / 6. Fauna afectada por cambios en calidad del agua.	Barreras de contención, estanques de decantación, monitoreo de calidad, tratamiento de efluentes, sellado de zonas críticas, sistema de alarma.
<b>J. Eventos extremos (lluvias 1:100, sismos)</b>	8 / 8. Elevado potencial de erosión y deslizamiento.	9 / 9. Riesgo alto de traslado de contaminantes por escorrentía.	5 / 4. Polvo en episodios y emisiones por daños.	7 / 7. Daños a nichos vegetales.	7 / 7. Afectación severa a fauna.	Diseño con factores de seguridad aumentados, drenajes sobredimensionados, monitoreo sísmico, planes de emergencia, rutas de evacuación, simulacros.

### 3.4 PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

#### 3.4.1 Cronograma de actividades

El plan de ejecución y cronograma de actividades desarrollado en la investigación se muestra a mayor detalle en la **Tabla 2**.

**Tabla 2:***Cronograma de actividades de ejecución de la investigación.*

Nº	Actividades.	Tiempo (meses)					
		2025-2026					
		O	N	D	E	F	M
1.	Planificación del plan de investigación.						
1.1	Planteamiento de los problemas.	X					
1.2	Marco teórico.	X					
1.3	Diseño metodológico.	X					
1.4	Presentación del plan de investigación.	X					
2.	Autorización de ejecución.						
2.1	Presentación a Dirección de Investigación de la EPG.	X					
2.2	Aprobación.		X				
3.	Ejecución del proyecto de investigación.						
3.1	Preparación de instrumentos.		X				
3.2	Validación de instrumentos.		X				
3.3	Selección de muestras.		X				
3.4	Toma de datos de campos.			X			
3.5	Toma de datos de laboratorio.			X			
3.6	Sistematización y organización de datos.				X		
3.7	Análisis e interpretación de datos.					X	
4.	Redacción de la tesis.						
4.1	Redacción del informe.					X	
4.2	Redacción del artículo de investigación.						X
4.3	Conclusiones y sugerencias.						X
4.4	Sustentación						X

**3.4.2 Asignación de recursos**

Recursos humanos: Los recursos de los humanos con los que se contó en el presente proyecto para su realización son: 1 Ingeniero geotécnico, 1 Técnico de laboratorio, 1 Especialista ambiental, 2 ayudantes de campo.

Recursos materiales: En este punto básicamente se tiene: Equipos de laboratorio (Proctor, CBR, tamices, horno, balanza), Vehículos para transporte de muestras, Cloruro de sodio, Software.

### 3.4.3 Costos y financiamiento

La asignación de recursos y los costos estimados de la ejecución de la presente investigación se muestran en la **Tabla 3**.

**Tabla 3**

*Costos a precios reales de la ejecución de la investigación.*

<b>Rubro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio sub total</b>
<b>1. Personal</b>				
-Ingeniero Geotécnico	Mes	04	1200.00	4,800.00
-Especialista Ambiental	Mes	02	700.00	1,400.00
-Personal de apoyo.	Mes	06	450.00	2,700.00
<b>2. Material y Equipo</b>				
-Lapiceros.	Und.	12	2.00	24.00
-Papel bond 80g. A4.	Millar	02	26.00	52.00
-Folder.	Und.	24	0.50	12.00
-Tinta de impresora.	Und.	01	240.00	240.00
-Fotocopiado de hojas.	Ciento	04	10.00	40.00
-USB (64 GB).	Und	01	65.00	65.00
-Computadora portátil.	Und.	01	3000.00	3,000.00
-Impresora.	Und.	01	500.00	500.00
-Cámara fotográfica.	Und.	01	500.00	500.00
-Textos.	Und.	06	80.00	480.00
-Artículos digitales.	Und.	05	105.00	525.00
<b>3. Servicios</b>				
-Internet. (horas)	Hrs.	30	1.00	30.00
-Ensayos de laboratorio.	Glb.	10	260.00	2,600.00
-Impresión informe.	Und.	06	10.00	48.00
-Refrigerio.	Glb.	06	40.00	240.00
-Tipeo de proyecto.	Und.	01	60.00	40.00
-Tipeo del informe.	Und.	01	100.00	100.00
<b>4. Otros</b>				
-Pasajes y refrigerios.	Glb.	01	6000.00	6,000.00
Total S/.				23,396.00

Nota. Autofinanciado con apoyo de la empresa minera.

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACIÓN DEL DISEÑO**

#### **4.1.1 Ubicación del proyecto:**

El proyecto denominado Depósito de Relaves Ramahuayco Zona B se localiza en el departamento de Ayacucho, provincia de Víctor Fajardo, distrito de Canaria, específicamente al oeste de la mina, en el sector superior de la quebrada Sacllani; geográficamente se emplaza en las coordenadas UTM N = 8 454 251.908 y E = 614 912.442, encontrándose aproximadamente a 100 m aguas arriba de las oficinas de la mina y a una distancia aproximada de 12,00 km respecto a la planta concentradora, en un entorno que corresponde a la unidad fisiográfica altoandina de la región.

#### **Figura 1**

*Ubicación del estudio presa de relaves Ramahuayco.*

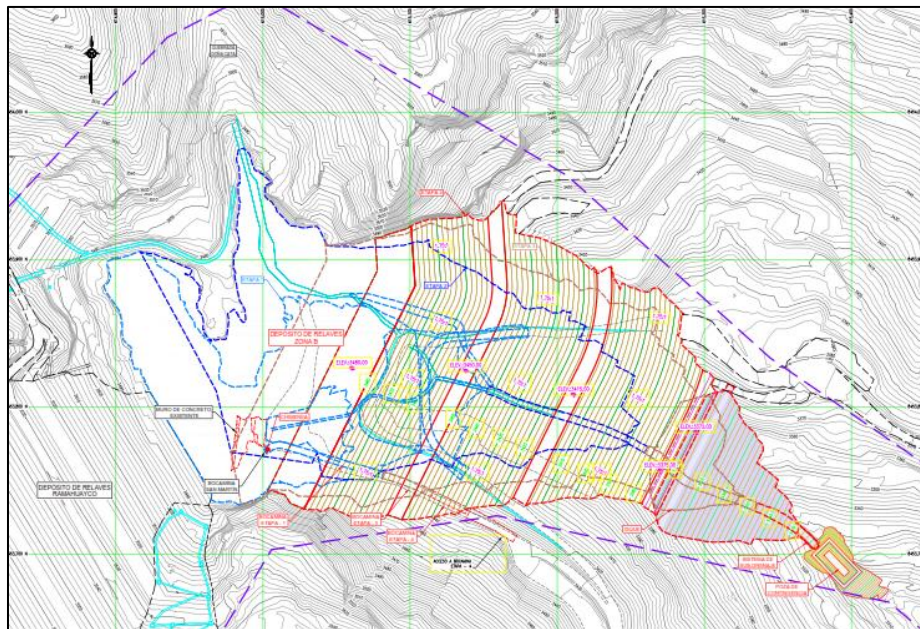


#### 4.1.2 Levantamiento Topográfico:

Los Estudios topográficos se realizaron en el vaso, eje y áreas de interés (drenaje, sub drenaje, etc.). Sobre esta información, se ha trazado el eje de presa, y sobre los diferentes componentes del represa-miento (Cuerpo de presa, obras de excedencia, caminos de acceso, etc), principalmente en la figura 2 se muestra el plano de topografía.

**Figura 2**

*Plano topográfico de la vista en planta.*



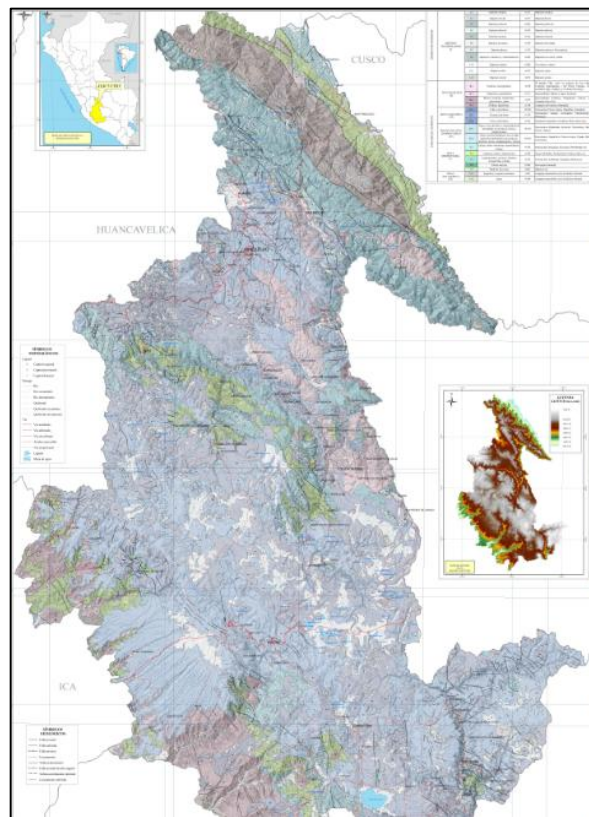
#### 4.1.3 Geología regional y local:

El área de estudio se ubica en el sur del Perú, en la Cordillera Occidental. A nivel regional, predominan unidades geológicas de los grupos Mitu (Pérmico) y Pucará (Triásico–Jurásico), además de rocas intrusivas y depósitos cuaternarios. El Grupo Mitu está compuesto por areniscas y conglomerados rojizos, mientras que el Grupo Pucará corresponde principalmente a calizas con intercalaciones de lutitas, yeso y areniscas.

A nivel local, el depósito de relaves filtrados Ramahuayco se emplaza sobre estas unidades y cuerpos intrusivos (pórfidos y dioritas). Se identifican conglomerados en la parte baja y calizas intruidas en la zona media-alta. Las unidades han sido subdivididas según sus características litológicas y grado de alteración, lo que influye directamente en las condiciones geotécnicas del proyecto. (**Figura 3**).

### **Figura 3**

*Plano geológico de la zona de Ayacucho.*


















#### **4.1.4 Geotecnia**

- **Caracterización de materiales:**

Los materiales que componen el modelo geotécnico (unidades geotécnicas) fueron identificadas en el presente estudio. En la **Tabla 4** se muestran las unidades geotécnicas identificadas. En las **Figura 4**, se muestra la sección B del depósito de relaves filtrados – Zona B en sus etapas de construcción.

**Tabla 4**

*Unidades geotécnicas del lugar de estudio.*

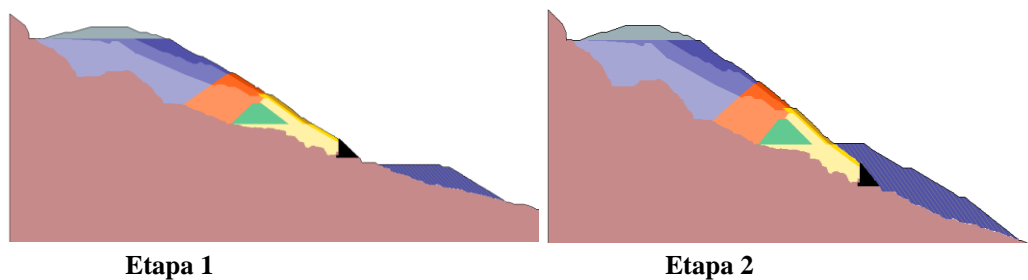
<b>Unidad geotécnica</b>	<b>Color</b>
U-01: Basamento rocoso (*)	
U-02: Material de préstamo (*)	
U-3A: Mezcla de relave (Dique D-2 2015) (*)	
U-3B: Mezcla de relave (Dique D-2 2017) (**)	
U-3C: Mezcla de relave (Dique D-2 2019)	
U-4A: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2015) (*)	
U-4B: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2017) (**)	
U-4C: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2019-2021)	
U-4D: Mezcla de relave (Zona B)	
U-5A: Enrocado (2015) (*)	
U-5B: Enrocado (2017) (**)	
U-5C: Enrocado (2019)	
U-5D: Enrocado (Zona B)	
U-06: Relave filtrado (Vaso RF 2021)	
U-07: Muro de concreto (*)	

La presa cuenta con cuatro etapas de operación, las cuales desde su inicio ha ido modificándose y creciendo en altura, los perfiles de estas etapas se pueden apreciar en la Figura 4. Los perfiles correspondientes a estas etapas,

donde se evidencia la evolución de la presa a lo largo del tiempo, se presentan en la **Figura 4**.

#### **Figura 4**

*Etapas de la operación de la presa.*



En la **Figura 4**, se puede apreciar el perfil y por tanto la crecida de los volúmenes de almacenamiento del material de mezcla, teniendo en la etapa 1 un volumen de almacenamiento de 271,262.07 m<sup>3</sup>, aumentando esta hasta la etapa 2 en la que se tiene un volumen de 630,291.14 m<sup>3</sup>.

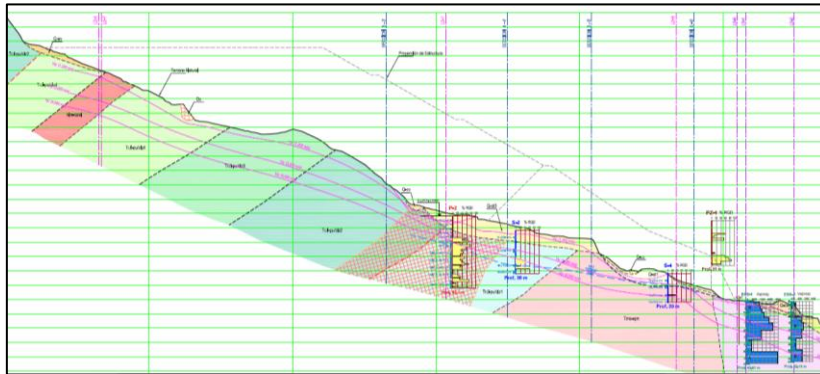
Los materiales están caracterizados en las unidades geotécnicas siguientes:

- **Unidad 01: Basamento Rocoso**

Las condiciones de cimentación del depósito de relaves fueron evaluadas mediante investigaciones geotécnicas y geológicas, considerando la morfología de la quebrada, la calidad del macizo rocoso. La fundación se apoya principalmente en calizas Pucará, pórfido monzonítico y conglomerados Mitu y Sacllani, los cuales proporcionan condiciones estructurales y mecánicas adecuadas para la estabilidad de la presa.

## Figura 5

*Plano topográfico de vista en sección de la cimentación del depósito de relaves filtrados.*



Se observa en la **figura 5**, el plano topográfico de vista en sección de la cimentación del depósito de relaves filtrados, en el que se representa el perfil del terreno natural y la geometría de la cimentación proyectada, permitiendo identificar las cotas, pendientes y estratigrafía relevante para el análisis geotécnico y la evaluación de la estabilidad del depósito.

### - **Unidad 02: Material de préstamo conformado en el dique D-1**

El material de préstamo conformado en el dique D-1 ha sido evaluado, siendo clasificado como una grava arcillosa con limo y arena (GC-GM) con un rango de gravas que varía entre 21 y 47%, un rango de arenas que varía entre 26 y 34% y un rango de finos que varía entre 26 y 44%. El número de golpes N de SPT, obtenido de la correlación con cono Peck, varía entre 13 y 40 clasificando como un material con compacidad densa a muy densa.

### - **Unidad 03 y 04: Material de mezcla de relave (Vaso RF-1 y Dique D-2)**

En la etapa de diseño, se evaluaron alternativas en base al uso de mezcla de relaves filtrados con material de cantera para conformar el depósito. Las

mezclas de relaves filtrados con suelos gravosos arcillosos de cantera (en proporción de 3 a 1), resultan en materiales de adecuada resistencia para los taludes de diseño de la presa.

- **Unidad 05: Material de enrocado**

El material del enrocado Ramahuayco ha sido caracterizado mediante ensayos de granulometría global. A partir de estos resultados se estableció que el tamaño máximo de partícula en el enrocado Ramahuayco es de 16" y que presenta en promedio un 58.6% de cantos, 40.9% de gravas, 0.3% de arenas y 0.2% de finos.

**Figura 6**

*Enrocado Ramahuayco – muestra tamizada a mallas convenientes en los laboratorios.*



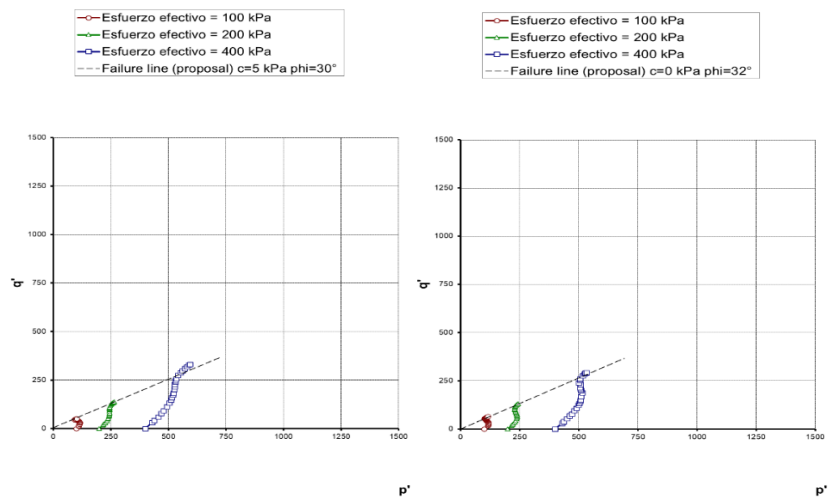
En la **figura 6**, corresponde a una muestra representativa que fue sometida a un proceso de tamizado en laboratorio mediante mallas convenientes, con la finalidad de determinar su distribución granulométrica y verificar su idoneidad para su uso en la conformación del depósito.

- **Unidad 06: Relave filtrado**

La evaluación de la resistencia cortante de los relaves filtrados se, siendo clasificado como una arcilla limosa (CL) con un porcentaje de grava de 0%, un porcentaje de arena de 32.5% y un porcentaje de finos de 67.5%.

**Figura 7**

*Ensayos triaxiales de resistencia del suelo.*



En la **figura 07** observamos que, los parámetros de resistencia obtenidos en el relave filtrado varían en el rango de 30 a 32° y con una cohesión entre 0 kPa y 5 kPa. Los ensayos de laboratorio permitieron definir los valores de resistencia cortante del relave filtrado, y nos permitió usar de manera conservadora los valores siguientes: cohesión 5 kPa y ángulo de fricción de 30°.

- **Ensayos Geotécnicos:**

Las investigaciones geotécnicas y geofísicas se ejecutaron para caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del depósito de relaves filtrados Ramahuayco y evaluar su estabilidad en condiciones actuales. Estas incluyeron ensayos in situ en calicatas y prospección geofísica MASW y MAM, orientadas a definir la estratigrafía del subsuelo, la rigidez del macizo rocoso y la identificación de zonas de debilidad. Perfiles de ondas superficiales (MASW y MAM)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las coordenadas de los puntos centrales de los ensayos MASW y MAM:

**Tabla 5**

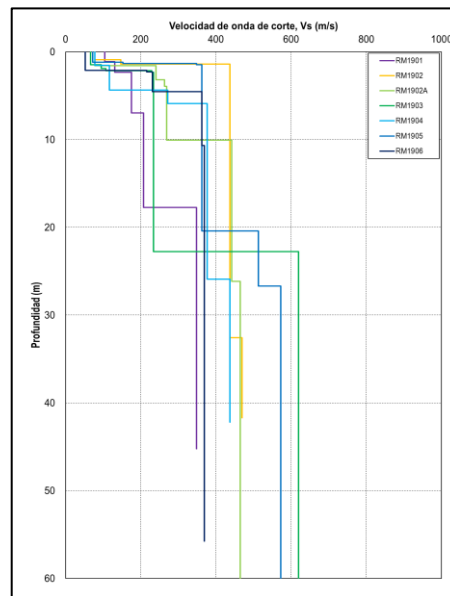
*Ubicación de los sondeos MASW y/o MAM.*

Sondeo	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)	Zona
R-MASW-1	614,716.2	8'453,658.7	3,567.7	Vaso RF-1
R-MASW-2	614,784.7	8'453,753.4	3,536.9	Dique D-2
R-MASW-3	614,807.9	8'453,714.3	3,536.9	Dique D-2
R-MASW-4	614,826.0	8'453,684.0	3,536.8	Dique D-2
R-MASW-5	614,862.5	8'453,747.9	3,508.7	Dique D-1
R-MASW-6	614,681.5	8'453,718.2	3,567.7	Vaso RF-1
MASW-11	614,825.9	8'453,783.3	3,532.0	Vaso RF-1
MASW-12	614,869.5	8'453,755.7	3,522.0	Enrocado T-1
MASW-13	614,848.6	8'453,742.3	3,533.0	Vaso RF-1
MASW-14	614,928.7	8'453,796.3	3,478.0	Enrocado T-1
MASW-15	614,778.3	8'453,713.5	3,569.0	Vaso RF-1
MASW-16	614,686.5	8'453,657.8	3,603.7	Vaso RF-1
MAM-01	614,928.7	8'453,796.3	3,478.0	Enrocado T-1
MAM-03	614,778.3	8'453,713.5	3,569.0	Vaso RF-1
MAM-04	614,686.5	8'453,657.8	3,603.7	Vaso RF-1
RM-1901	614,598.6	8'453,648.3	3587	Vaso RF-1
RM-1902	614,739.3	8'453,663.5	3548	Vaso RF-1
RM-192A	614,786.1	8'453,601.0	3574	Vaso RF-1
RM-1903	614,782.1	8'453,700.2	3538	Vaso RF-1
RM-1904	614,827.0	8'453,720.4	3512	Dique D-2
RM-1905	614,887.8	8'453,730.3	3496	Enrocado T-1
RM-1906	614,669.3	8'453,646.0	3571	Vaso RF-1

A partir de los ensayos de prospección sísmica, se ha podido conocer la distribución de rigideces a través de los materiales que componen la estructura de contención perimetral del depósito de relaves filtrados Ramahuayco. Ello puede ser observado en la **Figura 8**.

## Figura 8

Perfil de velocidades de corte  $V_s$  realizados en el depósito de relaves filtrados Ramahuayco.



Se observa en la **Figura 8**, que los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados en el depósito de relaves filtrados Ramahuayco, el cual permite caracterizar las propiedades dinámicas de los materiales y su comportamiento geotécnico para los análisis de respuesta sísmica y estabilidad del depósito.

## Tabla 6

Clasificación sísmica.

Tipo de suelo	Denominación	Velocidad de onda de corte, $V_s$ (m/s)
A	Roca muy dura	Mayor a 1500
B	Roca o suelo muy rígido	Entre 760 y 1500
C	Suelo muy denso o roca blanda	Entre 360 y 760
D	Suelo rígido	Entre 180 y 360
E	Suelo blando	Menor a 180

Nota. AASHTO (2012)

Tomando en cuenta la clasificación sísmica AASHTO (2012), podemos clasificar los materiales que componen los primeros 10 metros como un suelo rígido, mientras que a mayores profundidades se encuentran suelos muy densos.

**- Excavaciones manuales**

El programa de investigación de campo consideró la exploración mediante la excavación manual de siete (07) calicatas de hasta 2.00 m. En las exploraciones realizadas se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos siguiendo los procedimientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS-ASTM D-2488-00). Asimismo, se tomaron muestras disturbadas de las paredes de las calicatas, las cuales fueron identificadas y debidamente protegidas para su posterior envío al laboratorio de mecánica de suelos.

En las siguientes tablas se resumen las calicatas y trincheras, que fueron investigadas en el proyecto:

**Tabla 7**

*Relación de calicatas ejecutadas.*

<b>Sondeo</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Norte (m)</b>	<b>Elevación (msnm)</b>	<b>Zona</b>
C-1	614,817.6	8'453,726.8	3,528.69	Dique D-2
C-2	614,829.6	8'453,701.8	3,528.68	Dique D-2
C-3	614,846.8	8'453,676.8	3,528.63	Dique D-2
C-4	614,737.2	8'453,729.6	3,540.47	Vaso RF-1
C-5	614,759.0	8'453,697.2	3,540.37	Vaso RF-1
C-6	614,638.8	8'453,642.0	3,579.01	Vaso RF-1
C-7	614,640.3	8'453,633.2	3,578.83	Vaso RF-1
C-8	614,852.1	8'453,762.8	3,508.42	Dique D-1
C-9	614,851.7	8'453,768.6	3,508.61	Dique D-1
R-1	614,716.2	8'453,658.6	3,567.00	Vaso RF-1
R-2	614,784.7	8'453,753.4	3,536.00	Dique D-2
R-3	614,861.8	8'453,747.6	3,508.00	Dique D-1

Sondeo	Este (m)	Norte (m)	Elevación (msnm)	Zona
R-4	614,681.6	8'453,718.1	3,567.00	Vaso RF-1
CI-1	614,767.0	8'453,656.0	3,574.90	Dique D-2
CI-2	614,634.0	8'453,689.0	3,603.20	Vaso RF-1
CE-1	614,927.0	8'453,748.0	3,488.80	Enrocado T-1
CE-2	614,919.0	8'453,723.0	3,502.70	Enrocado T-1
CE-3	614,893.0	8'453,724.0	3,515.80	Enrocado T-1
CR-1	614,869.3	8'453,646.9	3,533.35	Dique D-2
CR-2	614,831.4	8'453,713.5	3,532.01	Dique D-2
CR-3	614,796.9	8'453,767.5	3,534.34	Dique D-2
CR-4	614,891.5	8'453,746.1	3,478.00	Enrocado T-1
CR-5	614,947.9	8'453,783.8	3,478.00	Enrocado T-1
CXRM-1901	614,797.0	8'453,576.0	3,603.00	Vaso RF-1
CXRM-1902	614,739.0	8'453,675.0	3,602.00	Vaso RF-1
CXRM-1903	614,791.0	8'453,697.0	3,577.00	Vaso RF-1
CXRM-1904	614,835.0	8'453,698.0	3,558.00	Dique D-2
CXRM-1905	614,678.0	8'453,656.0	3,605.00	Vaso RF-1
CXRM-1906	614,785.0	8'453,601.0	3,602.50	Vaso RF-1
CXRM-1907	614,884.0	8'453,749.0	3,524.00	Enrocado T-1

- **Ensayos de densidad in situ**

Se ha ejecutado ensayos de densidad insitu, siguiendo el método de cono de arena calibrada que indica la norma D1556 – ASTM. Los resultados de estos ensayos se muestran en la [Tabla 8](#). No se encuentra el origen de la referencia.8

**Tabla 8**

*Ensayos de densidad in situ (cono y arena calibrada).*

Sondaje	Muestra	Prof. (m)	DN <3/4 (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	DS <3/4 (g/cm <sup>3</sup> )
C-1	Mezcla de relave	0.50	2.28	9.48	2.10
C-1	Mezcla de relave	1.00	2.29	9.70	2.10
C-1	Mezcla de relave	1.50	2.28	10.14	2.08

<b>Sondaje</b>	<b>Muestra</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b>DN &lt;3/4 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>H (%)</b>	<b>DS &lt;3/4 (g/cm<sup>3</sup>)</b>
C-1	Mezcla de relave	2.00	2.24	10.56	2.05
C-2	Mezcla de relave	0.50	2.22	8.97	2.06
C-2	Mezcla de relave	1.00	2.20	10.04	2.03
C-2	Mezcla de relave	1.50	2.19	10.28	1.99
C-2	Mezcla de relave	2.00	2.30	9.76	2.15
C-3	Mezcla de relave	0.50	2.05	9.07	1.90
C-3	Mezcla de relave	1.00	2.25	9.15	2.10
C-3	Mezcla de relave	1.50	2.33	9.40	2.16
C-3	Mezcla de relave	2.00	2.33	8.10	2.19
C-4	Mezcla de relave	0.50	2.19	10.80	2.01
C-4	Mezcla de relave	1.00	2.28	9.52	2.09
C-4	Mezcla de relave	1.50	2.00	9.50	1.85
C-4	Mezcla de relave	2.00	2.41	9.96	2.19
C-5	Mezcla de relave	0.50	2.21	11.23	2.04
C-5	Mezcla de relave	1.00	2.33	10.09	2.13
C-5	Mezcla de relave	1.50	2.35	9.17	2.15
C-5	Mezcla de relave	2.00	2.43	9.19	2.23
C-6	Mezcla de relave	0.50	2.34	8.92	2.23
C-6	Mezcla de relave	1.00	2.06	8.72	2.02
C-6	Mezcla de relave	1.50	2.02	8.72	1.89
C-6	Mezcla de relave	2.00	2.19	8.82	2.03
C-7	Mezcla de relave	0.50	2.32	9.08	2.13
C-7	Mezcla de relave	1.00	2.14	10.36	2.01
C-7	Mezcla de relave	1.50	2.13	9.45	1.97
C-7	Mezcla de relave	2.00	2.23	9.61	2.05
C-8	Material de préstamo	0.80	2.26	7.62	2.12
C-9	Material de préstamo	0.80	2.01	7.23	1.95
R-1	Mezcla de relave	1.20	2.51	9.83	2.28
R-2	Mezcla de relave	1.00	2.48	9.08	2.27
R-3	Material de préstamo	1.00	2.24	9.26	2.05
R-4	Mezcla de relave	1.20	2.51	9.45	2.30
CE-1	Enrocado	0.20	2.27	6.30	2.15

Sondaje	Muestra	Prof. (m)	DN <3/4 (g/cm <sup>3</sup> )	H (%)	DS <3/4 (g/cm <sup>3</sup> )
CE-2	Enrocado	0.20	2.26	7.56	2.12
CE-3	Enrocado	0.20	2.27	5.90	2.18
CR-1	Mezcla de relave	1.20	2.36	11.30	2.12
CR-2	Mezcla de relave	1.20	2.23	9.60	2.04
CR-4	Enrocado T-1	0.50	2.03	1.11	2.00
CR-5	Enrocado T-1	0.50	2.06	1.02	2.04
CXRM-1901	Mezcla de relave	1.40	2.16	10.33	1.96
CXRM-1901	Mezcla de relave	2.00	2.28	8.85	2.10
CXRM-1902	Mezcla de relave	1.71	2.26	10.25	2.05
CXRM-1902	Mezcla de relave	2.30	2.30	10.11	2.09
CXRM-1903	Mezcla de relave	1.40	2.25	10.19	2.07
CXRM-1903	Mezcla de relave	1.80	2.24	10.83	2.04
CXRM-1904	Mezcla de relave	1.40	2.11	11.29	1.92
CXRM-1904	Mezcla de relave	1.80	2.33	10.84	2.12
CXRM-1905	Mezcla de relave	1.40	2.27	9.03	2.11
CXRM-1905	Mezcla de relave	2.50	2.34	11.64	2.10
CXRM-1906	Mezcla de relave	1.40	2.35	10.17	2.15
CXRM-1906	Mezcla de relave	2.00	2.35	8.93	2.16

Nota. DS= Densidad seca, DN= Densidad natural, H=Humedad

#### - Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos

Durante el desarrollo de las exploraciones geotécnicas de campo desarrolladas, se obtuvieron muestras representativas de suelos de las calicatas y trincheras ejecutadas. En estos materiales se llevaron a cabo ensayos de laboratorio con el objetivo de caracterizar física y mecánicamente los materiales del dique, relave y de la cimentación.

Se realizaron ensayos granulométricos, contenido de humedad, límites de Atterberg, ensayos de gravedad específica, permeabilidad, corte directo y ensayo triaxial consolidado drenado a los materiales extraídos.

Entre los ensayos especiales realizados para caracterizar los parámetros geotécnicos de los materiales, se tiene cuatro (04) ensayos triaxiales, realizados en el cuerpo del depósito; los cuales se complementan con un (01) ensayo de permeabilidad de pared flexible.

Los ensayos ejecutados fueron: análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422), límites de Atterberg (ASTM D-4318), clasificación SUCS (ASTM D-2487) y contenido de humedad (ASTM D-2216).

**Tabla 9***Parámetros índices de las calicatas.*

Muestra	Prof. (m)	Tipo	Granulometría			Límites Atterberg			SUCS
			G (%)	A (%)	F (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	
C-1	1.00	Mezcla	10.7	31.9	57.4	21	17	4	ML
C-1	2.00	Mezcla	12.9	32.4	54.7	21	18	3	ML
C-2	1.00	Mezcla	6.2	31.1	62.7	22	13	9	CL
C-2	1.00	Mezcla	17.0	33.1	49.9	21	20	1	SM
C-2	2.00	Mezcla	25.2	26.0	48.8	17	8	9	SC
C-3	1.50	Mezcla	20.5	29.5	50.0	19	10	9	SC
C-4	1.00	Mezcla	15.5	29.6	54.9	18	13	5	CL-ML
C-4	2.00	Mezcla	6.5	31.4	62.1	18	12	6	CL-ML
C-5	1.00	Mezcla	14.1	31.1	54.8	23	12	11	CL
C-5	1.00	Mezcla	14.8	31.3	53.9	18	8	10	CL
C-5	1.50	Mezcla	12.0	33.9	54.1	19	15	4	CL-ML
C-6	1.00	Mezcla	46.0	23.2	30.8	20	16	4	GC-GM
C-6	2.00	Mezcla	19.2	31.8	49.0	22	15	7	SC-SM
C-7	1.00	Mezcla	32.2	26.5	41.3	19	12	7	GC-GM
C-7	2.00	Mezcla	28.1	28.7	43.2	26	13	13	SC
C-9	0.50	Préstamo	47.2	26.7	26.1	26	19	7	GC-GM
R-3	1.00	Préstamo	21.5	34.4	44.1	25	15	10	SC
R-4	1.00	Mezcla	19.3	27.6	53.1	22	15	7	CL-ML
R-1	1.50	Mezcla	17.1	31.5	51.4	23	15	8	CL
R-2	1.00	Mezcla	24.5	28.0	47.5	24	15	9	SC
R-2	2.00	Mezcla	19.1	30.4	50.5	23	14	9	CL
ME-2		Mezcla	13.2	34.4	52.5	19	14	5	CL-ML
CI-1	0.50	Mezcla	22.5	31.2	46.3	18	14	4	SC-SM
CI-2	0.90	Mezcla	20.1	32.9	47.0	22	14	8	SC
CI-3	1.00	Mezcla	12.4	32.1	55.5	20	14	6	CL-ML
CXRM-1901	2.00	Mezcla	0.9	37.3	61.8	17	12	5	CL-ML
CXRM-1902,1905	1.00	Mezcla	8.0	35.6	56.4	19	13	6	CL-ML
CXRM-1903,1904	2.00	Mezcla	13.8	33.7	52.6	19	14	5	CL-ML
CXRM-1906	2.50	Mezcla	4.6	38.0	57.4	17	13	4	CL-ML

Nota. G (%): Grava; A (%): Arena; F (%): Finos; LL (%): Límite líquido; LP (%): Límite plástico; IP (%) Índice de plasticidad; SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Adicionalmente a los ensayos antes mencionados, se realizaron ensayos de gravedad específica del material grueso y fino. Los resultados de estos ensayos se incluyen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.10**.

**Tabla 10**

*Ensayos de gravedad específica.*

Sondaje	Material	Profundidad (m)	SUCS	Gs
R-1	Mezcla	1.30	CL-ML	2.879
R-1	Mezcla	1.60	CL	3.068
R-2	Mezcla	1.30	SC	3.036
R-2	Mezcla	1.30	CL	3.068
R-3	Préstamo	1.00	SC	3.003
R-4	Mezcla	1.45	CL-ML	3.097
CR-1,2,3	Mezcla	1.00	CL-ML	2.890
CXRM-1902,1905	Mezcla	-	CL-ML	3.010
CXRM-1903,1904	Mezcla	-	CL-ML	2.960

**Nota.** Gs: Gravedad específica; SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Las propiedades geotécnicas de la cimentación y los materiales que intervienen en el modelo geotécnico fueron evaluadas teniendo en consideración de resultados de los ensayos de: triaxial CD, densidad in situ, triaxial CU y corte directo.

**Tabla 11**

*Propiedades de resistencia.*

Sondaje	Material	Ensayo	Remoldeo		Efectivos	
			$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	c' (KPa)	$\phi'$ (°)
C-2	Mezcla	TX CU 4"	2.17	7.40	76.0	32.4
C-5	Mezcla	TX CU 4"	2.21	9.00	46.5	36.4
C-7	Mezcla	TX CU 4"	2.25	5.80	37.7	49.3

Sondaje	Material	Ensayo	Remoldeo		Efectivos	
			$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	w (%)	c' (KPa)	$\phi'$ (°)
C-2	Mezcla	CD	2.00	10.0	15.0	33.9
C-5	Mezcla	CD	2.15	10.0	30.8	34.2
C-7	Mezcla	CD	2.00	10.0	0.0	38.6
R-2	Mezcla	TX CU 4"	2.38	4.40	-	-
R-3	Préstamo	TX CU 4"	2.00	9.50	0.0	35.0
R-4	Mezcla	TX CU 4"	2.20	9.80	28.0	36.0
ME-2	Mezcla	TX CD 4"	2.25	10.0	90.0	32.0
CI-1	Mezcla	TX CD 4"	2.16	7.00	35.0	34.0
CI-2	Mezcla	TC CD 4"	2.27	6.53	24.0	39.0
CR-1,2,3	Mezcla	TX CD 4"	2.10	10.0	12.0	34.5
CR-4,5	Enrocado	TX CD 4"	1.71	2.0	91	32.0
CXRM-1901	Mezcla	TX CU 4"	1.75	12.0	23.0	29.9
CXRM-1902,1905	Mezcla	TX CU 4"	2.00	10.0	15.0	32.5
CXRM-1903,1904	Mezcla	TX CU 4"	1.90	12.0	10.0	37.0
CXRM-1906	Mezcla	TX CD 4"	1.80	14.0	0.0	32.7

Nota.  $\rho_d$ : Densidad seca, w: Humedad, c: Cohesión,  $\phi$ : Ángulo de fricción

Se ha realizado el ensayo de conductividad hidráulica en pared flexible (ASTM D-5084), para los materiales extraídos de las calicatas CXRM-1902 y CXRM-1905. Los resultados obtenidos se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.12.**

**Tabla 12**

*Ensayo de conductividad hidráulica.*

Sondaje	Material	Prof. (m)	SUCS	k (cm/s)
R-2	Mezcla	1.30	SC	4.00 E-8
R-3	Préstamo	1.00	SC	6.30 E-10
R-4	Mezcla	1.45	CL-ML	6.10 E-8
CI-1	Mezcla	0.50	SC-SM	1.50 E-8
CI-2	Mezcla	0.90	SC	2.40 E-9
CXRM-1902,1905	Mezcla	-	CL-ML	1.20-6

NOTA: SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; k: Permeabilidad

- **Perforaciones diamantinas:**

En la cimentación y vaso del proyecto Ramahuayco se han ejecutado once sondeos diamantinos, con diámetro HQ3; de los cuales cuatro perforaciones se han ejecutado en el año 2007 (S-1 al S-4) y siete perforaciones (P-1 al P-7) en el año 2010.

**Tabla 13**

*Sondeos ejecutados en la cimentación de la presa y vaso de Ramahuayco.*

Ubicación	Sondeo	Coordenadas		Cotas (msnm)	Prof. (m)	Inclina. (*)	Orient. (*)	Año
		Norte	Este					
Vaso	P-7	8454109.89	614948.22	3504.19	40.10	-90	-	2010
	P-2	8454119.83	615034.3	3478.12	50.10	-90	-	2010
Cimiento Estribo Izq.	P-1	8454198.16	615027.18	3522.31	70.00	-90	-	2010
Cimentación Sector Central	P-6	8454150.51	615046.69	3478.75	40.10	-45	N82O	2010
	S-2	8454145.44	615070.07	3468.09	30.00	-90	-	2007
	S-3	8454166.75	615056.1	3484.04	25.00	-90	-	2007
Cimentación Estribo Derecho	P-3	8454066.82	615091.56	3514.23	70.00	-90	-	2010
	P-4	8454088.58	615052.79	3494.05	50.40	-70	S87E	2010
	P-5	8454067.13	615048.25	3509.82	40.00	-45	N82O	2010
	S-1	8454090.74	615085.41	3500.94	30.00	-90	-	2007
Pie aguas abajo	S-4	8454194.51	615164.5	3438.02	20.00	-90	-	2007

#### 4.1.5 Hidrología

Se ha tenido en cuenta también los estudios sustentatorios que presento Catalina Huanca a las consultas realizadas por el ANA y el ALA en el 2011. Los periodos de evaluación para el estudio han sido de 200, 500, 1000 y 10000 años con adición del flujo hiperconcentrado.

Según el estudio de la hidrología regional del Perú (IILA-SENAMHI – UNI, 1983) el área del proyecto se ubica dentro de la zona hidrológica 4A, en la cual el nivel de precipitación es constante. Las dos estaciones que se encuentran cercanas al área del proyecto y dentro de la misma zona hidrológica son: Querobamba que tiene como coordenadas E73°50', S14°01' y cota de 3502 msnm; y Huacaña que tiene las coordenadas E73°53',

S14°10' y cota de 3150 msnm. En esta misma área hidrológica, se encuentran las estaciones Chipao y Aucara.

La cuenca colectora correspondiente al depósito de relaves propuesto y está localizada en sector alto andino y/o valle interandino del departamento de Ayacucho.

La cuenca aportante al área del Proyecto, está constituida por diversas microcuencas de escasa extensión y taludes estables en general. Para el tratamiento preventivo de las microcuencas antes mencionadas, es posible realizar un programa de revegetación en los sectores donde la presencia de suelos lo permita, con el propósito de incrementar la seguridad de las obras al limitarse la ocurrencia de fenómenos de deslizamientos hacia los cauces respectivos.

Los parámetros geomorfológicos del sistema son los siguientes:

- Área : 1.613 km<sup>2</sup>
- Perímetro : 8.05 km
- Índice de compacidad : 1.79
- Factor de forma : 0.26
- Cota máxima : 4030 msnm
- Cota mínima : 3400 msnm
- Pendiente media : 0.225 m/m
- Rectángulo equivalente:
  - L mayor = 2.64 Km
  - L menor = 1.41 Km
- Densidad de drenaje : 1.54 km/km<sup>2</sup>

El suelo posee por lo general, un mediano grado de permeabilidad.

En la región, de la vertiente del Atlántico, el patrón de precipitaciones y consecuentemente de descargas máximas presenta un sesgo estacional típico.

Las características de la cuenca Sacclani se puede observar en la siguiente Tabla.

**Tabla 14***Características de la cuenca Saccllani.*

<b>Cuenca</b>	<b>Área de cuenca (m<sup>2</sup>)</b>
Canal 1 (Cuenca A3)	7.7
Canal 2 (Cuencas A2 y A3)	62.2
Canal 3 (Cuencas A1, A2 y A3)	97.6
Canal 4 (Cuencas A1, A2, A3 y A5)	155.8
Canal 5 (Cuencas A1, A2, A3, A5 y A6)	172.1
Superficie del depósito	7.7

Los análisis de precipitación extrema se realizaron para un período de 200 años (en operaciones), conforme a la normatividad vigente, para condiciones de cierre 500 años, 1000 años y un periodo excepcional de 10,000 años.

El método de cálculo utilizado para la determinación de la precipitación extrema es el análisis estadístico de los registros de la estación Querobamba, mediante el modelo SSP, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica; el modelo IILA – SENAMHI –UNI, sólo se utilizó para identificar la zona hidrológica en la que se ubica el área del Proyecto.

Para el promedio de precipitaciones extremas, realizándose una distribución de lo más representativo, los registros se analizaron mediante el programa HEC SSP, formulado por el Hydrologic Engineering Center, asignado al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica. El programa ejecuta, previamente, la evaluación de datos que están en duda y genera, adicional de la curva de probabilidad teórica de ocurrencia de los eventos extremos, una curva de probabilidad esperada. Esta última curva, conforme a lo explicado en el Bulletin 17B del antes referido Hydrologic Engineering Center, pretende contrarrestar las distorsiones introducidas por la extensión de los registro.

**Tabla 15***Precipitación extrema en estaciones.*

Estación	Precipitación Tr = 200 años (mm)	Precipitación Tr = 500 años (mm)	Precipitación Tr = 1000 años (mm)	Precipitación Tr =10000 años (mm)
Querobamba	48.88	52.10	53.9	61.20

El tiempo de concentración se evaluó de acuerdo al modelo de lo propuesto en el Soil Conservation Service de los Estados Unidos de Norteamérica, en función de la longitud máxima, función del área y la pendiente de la cuenca. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5**, contiene los datos de las precipitaciones extremas típicas para las sub cuencas evaluadas, incluyendo tanto las cuencas aportantes de la quebrada Sacellani, correspondientes a períodos medios de recurrencia de 200, 500, 1000 y 10000 años.

**Tabla 16***Precipitación extrema en cuencas.*

Cuenca	Estación pluviométrica	Área de cuenca (ha)	Precipitación extrema (mm)			
			Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 10000
Canal 1 – Cuenca A3	Querobamba	7.7	22.1	23.5	24.4	27.7
Canal 2 – Cuencas A2 y A3	Querobamba	62.2	22.1	23.5	24.4	27.7
Canal 3 – Cuencas A1, A2, A3	Querobamba	97.6	22.1	23.5	24.4	27.7
Canal 4 – Cuencas A1, A2, A3, A5	Querobamba	155.8	22.1	23.5	24.4	27.7
Canal 5 –	Querobamba	172.1	22.1	23.5	24.4	27.7

Cuenca	Estación pluviométrica	Área de cuenca (ha)	Precipitación extrema (mm)			
			Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 10000
Cuencas A1, A2, A3, A5, A6						
Superficie del Depósito	Querobamba	7.7	22.1	23.5	24.4	27.7

La cuenca colectora en el área del Proyecto está conformada por una serie de micro cuencas. La microcuenca de mayor extensión cuenta con sólo 0.58 km<sup>2</sup> de superficie y la cuenca total con 1.61 km<sup>2</sup> de extensión.

Para el análisis de caudales en el sistema de canales colectores, se ha considerado la cuenca integral, para mejor ajustarse a la operación real del sistema, a diferencia de los cálculos originales en que se procesó independientemente cada una de las microcuencas que componen la cuenca del sistema (cuando se consideró un sistema de drenaje específico para cada micro cuenca).

**Tabla 17**

*Precipitación extrema en cuencas.*

Cuenca	Estación pluviométrica	Área de cuenca (ha)	Caudal extremo (m <sup>3</sup> /s)			
			Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 10000
Canal 1 – Cuenca A3	Querobamba	7.7	0.19	0.20	0.21	0.24
Canal 2 – Cuencas A2 y A3	Querobamba	62.2	1.53	1.62	1.69	1.91
Canal 3 – Cuencas A1, A2, A3	Querobamba	97.6	2.40	2.55	2.65	3.00
Canal 4 – Cuencas A1, A2, A3, A5	Querobamba	155.8	3.83	4.07	4.22	4.80

Cuenca	Estación pluviométrica	Área de cuenca (ha)	Caudal extremo (m <sup>3</sup> /s)			
			Tr = 200	Tr = 500	Tr = 1000	Tr = 10000
Canal 5 – Cuencas A1, A2, A3, A5, A6	Querobamba	172.1	4.23	4.49	4.67	5.30
Superficie del Depósito	Querobamba	7.7	0.19	0.20	0.21	0.24

Los caudales sólidos que principalmente se conducen por la quebrada, en donde se encuentra ubicado el depósito de relaves, fueron evaluados considerando la ocurrencia de derrumbes y consecuentes flujos hiperconcentrados en el cauce de la quebrada.

La estimación del transporte sólido en flujos hiperconcentrados, es muy insegura y para su estimación se podrían aplicar diversas fórmulas de estimación. Todas estas fórmulas son función, únicamente, del caudal líquido y de la pendiente del cauce.

Se ha considerado el transporte sólido de las microcuencas que conforman el sistema, aplicando modelos de estimación de flujos hiperconcentrados. Los caudales obtenidos han sido adicionados a los caudales líquidos, en el escenario de 1000 años de recurrencia media, para comparar los caudales totales en este escenario con los eventuales caudales líquidos del escenario de 10000 años de recurrencia media.

Es de acotarse que, a consecuencia de las características geológicas de las microcuencas asociadas al área de intervención del Proyecto, es poco probable la ocurrencia de eventos significativos de flujo hiperconcentrado (huaycos) en los cauces de las mismas.

### **Tabla 18**

*Características hidráulicas.*

Cuencas	Tr=1000 años		Caudal total (m3/s)	Tr=1000 años Diseño	
	Caudal líquido (m3/s)	Caudal sólido (m3/s)		Caudal líquido (m3/s)	Caudal total (m3/s)
A3	0.21	0.11	0.32	0.24	0.32
A2+A3	1.69	0.54	2.23	1.91	2.23
A1+A2+A3	2.65	0.54	3.19	2.99	3.19
A1+A2+A3+A5	4.23	0.67	4.90	4.78	4.90
A1+A2+A3+A5+A6	4.67	0.67	5.34	5.28	5.34
A7	0.18	0.15	0.33	0.20	0.33

En este proyecto de Relaves Filtrados Ramahuayco no se realizaron modificaciones al sistema hidráulico por lo que las estructuras seguirán con las características.

#### 4.1.6 Sismicidad

La sismicidad de la zona del proyecto la evaluó, mediante el informe emitido en julio de 2018 y se presenta en el anexo 6.1.2.2.3. La información para realizar el estudio se obtuvo de catálogos de sismos históricos e instrumentales, lo cual permitió crear un límite en forma más exacta de la ubicación de los datos sismogénicas y la estimación de la frecuencia de eventos sísmicos en los últimos cientos de años.

El sitio del proyecto Catalina Huanca está localizado en una área de sismicidad media a alta; donde la actividad sísmica se debe al proceso de subducción de la placa de Nazca debajo la placa Sudamericana a una media de 50 a 70 mm/año. El análisis realizado muestra que el peligro sísmico en el sitio del proyecto está dirigido por la zona de subducción de la placa de Nazca. Las fallas sísmicas activas y fuentes de corteza incluidas en el estudio no contribuyen al peligro sísmico. Esto se debe principalmente a la baja razón de desplazamiento (< 1mm/año) de las fallas sísmicas Cuzco y Trigal comparadas con la alta razón de desplazamiento de la placa de Nazca (50 a 70 mm/año).

- **Aceleración máxima**

Se estimó el nivel de aceleración máxima del terreno y el coeficiente sísmico a utilizar en el análisis de estabilidad pseudoestático del depósito de relaves filtrados; a partir del cual se sobreponen los siguientes comentarios:

En base a lo estimado se determinística del MCE (Maximum Credible Earthquake), conforme con las recomendaciones del código IBC, obtenido como el valor medio más una desviación estándar (P.84) del evento sísmico de control determinístico, se estima un valor de MCE determinístico para roca de 0.43 g, para el área de la unidad minera Catalina Huanca, en el punto de evaluación. El evento de control determinístico correspondiente a un evento sísmico en la fuente de Intraplaca de la placa de Nazca, por debajo del área de la unidad minera Catalina Huanca.

- **Los sismos que más contribuyen a la aceleración máxima (PGA)**

En área de la unidad minera Catalina Huanca son eventos que ocurren en la zona de subducción de Intraplaca de la placa de Nazca con Mw 7,5 a Mw 8,0 alrededor de 100 a 150 km del área de interés.

- **En base a la estimación probabilística**

Considerando un periodo de retorno de 500 años, para el área de la unidad minera Catalina Huanca, se ha estimado un valor de PGA para un suelo de tipo B de 0.33 g. Este estudio ha considerado también la evaluación de niveles de aceleraciones para otros periodos de retorno y aceleraciones espectrales. Por ejemplo, el valor del PGA para 1000 años de periodo de retorno es de 0.44 g y el valor del PGA para 2475 años de periodo de retorno es de 0.57 g.

Considerando las condiciones específicas del sitio, la aceleración horizontal máxima del terreno es de 0.33g. La fuente que más contribuye al peligro sísmico probabilístico en el sitio del proyecto es la fuente de intraplaca inferior de la Región Sísmica Ica (F6). Este resultado es acorde con los resultados del análisis determinístico y con la selección del Sismo Máximo Creíble (MCE).

**Tabla 19**

*Aceleraciones espectrales en roca ( $T=0.0$  seg), diferentes periodos de retorno.*

Modelo de Atenuación	Longitud (W)	Latitud (S)	Aceleración espectral		
			500	975	2475
Young et. al. 1997 (P.50)	74	14	0.33	0.44	0.57

- **Aceleración de diseño**

Como parte de este estudio se ha considerado hacer una revisión de los coeficientes sísmicos recomendados por distintos investigadores. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume algunas de las recomendaciones de mayor uso en la práctica. De estas recomendaciones, dos (2) de las que han sido más usadas en la práctica, como indican Bray y Travarasrou (2011), corresponden a Seed (1979) y Hynes – Griffin & Franklin (1984).

**Tabla 20**

*Recomendaciones para el cálculo del coeficiente sísmico por distintos autores.*

Autor	$k_h$	Observación
Seed (1979) (Aplicable si la aceleración en la corona es menor a 0.75g)	$k_h=0.10,$ $FS_{sismico} \geq 1.15$	Grandes deslizamientos y sitios cercanos a la fuente sísmica capaz de generar un sismo de Magnitud 6.5
	$k_h=0.15,$ $FS_{sismico} \geq 1.15$	Grandes deslizamientos y sitios cercanos a la fuente sísmica capaz de generar un sismo de gran magnitud (mayor a 8.0)
Marcuson et al. (1981)	$k_h=0.33 a_{m\acute{a}x}/g$ “a” $k_h=0.5 a_{m\acute{a}x}/g$	Considera posible la amplificación o amortiguamiento
Hynes-Griffin & Franklin (1984)	$k_h=0.5 a_{m\acute{a}x}/g$	La aceleración se define a nivel de basamento rocoso. Para presas y con $FS=1$ , concluyó que la presa no estará sujeta a deformaciones importantes
Saragoni (1993)	$k_h=0.3 a_{m\acute{a}x}/g$ $k_h=0.22(a_{m\acute{a}x}/g)^{0.33}$	Si $a_{m\acute{a}x} \leq 6.6 \text{ m/s}^2$ Si $a_{m\acute{a}x} \geq 6.6 \text{ m/s}^2$
Kramer (1996)	$k_h=0.5 a_{m\acute{a}x}/g$	Apropiado para muchos taludes, pero acota que no es una regla general, en concordancia con lo especificado por Hynes-Griffin & Franklin (1984)

**Nota:**  $k_h$ =Coeficiente sísmico

En base a los resultados del estudio de respuesta de sitio, considerando un sismo con periodo de retorno de 500 años, se tiene que la aceleración en corona es menor a 0.75 g, por lo que el coeficiente sísmico en base a Seed (1979) sería de 0.15g. En base al valor de PGA calculando a nivel de basamento rocoso, el coeficiente sísmico según Hynes-Griffin & Franklin (1984) sería de 0.17g. El rango de coeficientes sísmicos en base a otros estudios citados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, sería de 0.11g a 0.17g, el rango superior corresponde a Marcuson (1981), sin embargo, es importante mencionar la preferencia del uso de los otros métodos, Seed (1979) y Hynes-Griffin & Franklin (1984) en la práctica (Bray y Travasarou, 2011).

De acuerdo con el estudio desarrollado por SRK el coeficiente sísmico utilizado es 0.16 (~0.5PGA) para un periodo de retorno de 500 años. Este valor tiene conformidad con las recomendaciones de diferentes autores (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), siendo este valor el utilizado en el desarrollo del estudio.

- **Análisis de estabilidad física**

El análisis de estabilidad de taludes implicará el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de toda la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo, determinándose un factor de seguridad.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Dónde:

FS: Factor de seguridad

$\tau_f$ : Resistencia cortante promedio del suelo

$\tau_d$ : Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla

- **Metodología de análisis**

Para el análisis de estabilidad de taludes, se usó el programa SLIDE (Rocscience), versión 2018. Este es un programa de análisis de estabilidad de taludes completamente integrado, que permite: (1) Trabajar la geometría del talud interactivamente y (2) seleccionar los tipos y propiedades de los materiales.

El análisis para calcular el factor de seguridad ( $F_s$ ) se lleva a cabo de manera bidimensional usando el concepto de equilibrio límite. El programa tiene la capacidad de programar diferentes métodos de análisis de estabilidad de manera simultánea; sin embargo, para la presente investigación se ha utilizado el Método de Spencer empleando dovelas para el cálculo de superficies de falla. La superficie de falla crítica se entiende como aquella que presenta el valor más bajo del factor de seguridad. Esta es determinada mediante un proceso interactivo, en el cual se ajustaron progresivamente los parámetros de búsqueda para identificar la condición más desfavorable. Para este análisis, se consideraron tanto superficies de falla de forma circular como aquellas correspondientes al tipo bloque, con el fin de evaluar diferentes posibles mecanismos de inestabilidad.

Como base del análisis, se asume que los materiales que componen las distintas estructuras presentan un comportamiento homogéneo e isotrópico, quiere decir, que sus propiedades se mantienen uniformes en todas las direcciones. También, se considera que la falla ocurriría de manera simultánea a lo largo de toda la superficie de deslizamiento. No obstante, cada material conserva sus propias características y propiedades físicas y mecánicas, las cuales afectan en su comportamiento frente a las condiciones evaluadas.

En el caso del análisis pseudoestático, se supone que la masa potencialmente inestable está sometida a una aceleración horizontal, la cual se obtiene multiplicando el coeficiente sísmico por la aceleración de la gravedad. Este análisis permite incorporar el efecto de las fuerzas inerciales generadas por el sismo de diseño, facilitando así una evaluación más acertada del comportamiento de la estructura ante condiciones sísmicas.

#### **A) Criterios de evaluación**

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta los valores de los factores de seguridad mínimos de acuerdo al criterio del Ministerio de Energía y Minas (MEM).

**Tabla 21**

*Valores de factores de seguridad mínimos admisibles.*

<b>Factor de seguridad</b>	<b>MEM</b>
Estático	1.5
Pseudoestático	1.25

Se debe indicar que un factor de seguridad pseudoestático mayor a 1.0 no significa que la estructura no se moverá durante un terremoto. Lo que probablemente ocurra es que los desplazamientos serán mínimos y no se presentarán daños permanentes en la estructura, asociados al terremoto de diseño.

#### **B) Secciones de análisis**

El análisis de estabilidad se llevó a cabo sobre dos (2) secciones de análisis, las cuales se encuentran distribuidas de manera transversal y longitudinal en la estructura al depósito de relaves filtrados Ramahuayco. Estas secciones cortan perpendicularmente a las zonas más críticas o de mayor pendiente.

#### **C) Aceleración de diseño**

Para la condición pseudoestática se considera una aceleración sísmica de 0.16 g, equivalente a un sismo con período de retorno de 500 años.

#### **D) Características de los análisis**

- El escenario de análisis se ha considerado para condiciones estáticas y pseudoestáticas.
- Las secciones han sido analizadas buscando obtener fallas no circulares (método cuckoo search).

#### **E) Materiales**

Las características de los materiales que están involucradas en el modelo geotécnico son las que se muestran en la **Tabla 22**.

**Tabla 22***Propiedades geotécnicas de la presa de relaves para el modelo geotécnico.*

Unidad geotécnica	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
U-01: Basamento rocoso	22.0	250	40.0
U-02: Material de préstamo	20.0	40.0	32.0
U-3A: Mezcla de relave (Dique D-2 2015)	20.0	30.0	32.0
U-3B: Mezcla de relave (Dique D-2 2017)	21.0	0.0	40.0
U-3C: Mezcla de relave (Dique D-2 2019)	20.5	20.0	36.5
U-4A: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2015)	20.0	30.0	32.0
U-4B: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2017)	21.0	0.0	40.0
U-4C: Mezcla de relave (Vaso RF-1 2019)	20.5	20.0	36.5
U-4D: Mezcla de relave (Zona B)	20.5	20.0	36.5
U-5A: Enrocado (2015)	22.0	5.0	44.0
U-5B: Enrocado (2017)	21.5	5.0	44.0
U-5C: Enrocado (2019)	21.5	5.0	44.0
U-5D: Enrocado (Zona B)	21.5	5.0	44.0
U-06: Relave filtrado	16.0	5.0	28.0
U-06: Muro de concreto	22.0	250.0	40.0

Nota. Datos de ensayos de laboratorio.

En las unidades geotécnicas se utilizó el modelo Mohr Coulomb (M-C) para hacer los análisis de estabilidad.

#### **F) Resultados de análisis**

En la **Tabla 23** se presenta un resumen de los factores de seguridad obtenidos en los análisis de estabilidad física.

**Tabla 23***Factores de seguridad de los depósitos de relaves filtrados (fallas por zonas).*

Componente	Zona/Etapa	Sección analizada	Estático (k=0.00)	Pseudoestático (k=0.18)
	A	Sección B	2.53	1.49

DRF	B – Etapa 1	Sección B	1.72	1.26
Ramahuayco	B – Etapa 2	Sección B	1.723	1.26

A partir de los resultados obtenidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.23**, se puede concluir que el depósito de relaves filtrados Ramahuayco, da condiciones adecuadas de estabilidad en función a los requerimientos mínimos de seguridad establecidos por el MEM.

Para fines de cierre la resistencia a largo plazo será mayor, asegurando la geometría actual y las condiciones de seguridad requeridas para el cierre del depósito de relaves filtrados.

El depósito de relaves Ramahuayco es estable para la sección de análisis, si consideramos el criterio de aceptabilidad de  $FS > 1.5$ , el análisis pseudo estático indica que el depósito es estable si se considera un coeficiente horizontal máximo de 0.16g y un criterio de aceptabilidad  $FS > 1.25$ .

Se recomienda calibrar el modelo durante la etapa de construcción con los resultados del monitoreo, de manera de confirmar y/o verificar los desplazamientos esperados.

#### 4.1.7 Resultados del modelado

Se ha realizado en el software slide bajo condiciones estáticas la estabilidad de la presa de relaves mediante los métodos de equilibrio límite con la ecuación de Spencer, el reporte se muestra en la **Figura 9**.

#### Figura 9

*Análisis estático de la estabilidad del talud de la represa en Slide.*



depósitos de relaves, lo que representa una disminución considerable en costos de inversión, adquisición de terrenos y ejecución de obras adicionales. Esta optimización se formula en una mayor eficiencia del proyecto minero, mejorando su rentabilidad y sostenibilidad financiera a mediano y largo plazo.

- En cuanto al impacto ambiental, el uso de relaves filtrados hace menor contenido de humedad, reduciendo el riesgo de generación de lixiviados y filtraciones contaminantes hacia el suelo y los cuerpos de agua cercanos. El diseño del sistema de drenaje y el control de filtraciones contribuyen a mitigar impactos negativos, incitando a una gestión ambiental más responsable y alineada con la normativa vigente.

#### **4.2.2 Beneficios técnicos, económicos, sociales y científicos**

- Los beneficios técnicos del proyecto se reflejan en la validación de un diseño geotécnico optimizado que permite ampliar la capacidad de almacenamiento sin involucrar la estabilidad del depósito. La aplicación de análisis geotécnicos detallados, ensayos de laboratorio y modelaciones contribuye a reforzar los estándares de diseño y operación ejecutora de depósitos de relaves filtrados.
- Desde el punto de vista económico, el principal beneficio es la optimización de recursos, al maximizar la capacidad del depósito existente y evitar inversiones adicionales en nuevas infraestructuras. Esto reduce costos operativos y de capital, mejorando la eficiencia económica del proyecto minero.
- Desde el ámbito social, el proyecto contribuye al desarrollo de las comunidades cercanas, principalmente a través de la generación de empleo y la mejora en la gestión segura de los relaves. Contar con un depósito de relaves adecuadamente diseñado y operado reduce el riesgo de posibles incidentes que puedan afectar al entorno y a la población. Esto no solo brinda mayor seguridad, sino que también fortalece la

confianza y la relación entre la empresa minera y la comunidad, promoviendo una convivencia más responsable y sostenible.

- Los beneficios científicos se muestran en la generación de conocimiento aplicado en el rubro de la ingeniería geotécnica y la gestión de relaves filtrados. Los resultados del estudio pueden usarse como referencia técnica para futuros proyectos similares, contribuyendo al desarrollo de soluciones más seguras y sostenibles en las unidades mineras.

#### **4.2.3 Comparación con otros estudios o proyectos ya realizados en el ámbito internacional, nacional o local**

- Proyectos internacionales:

A nivel internacional, varios estudios han demostrado que la implementación del uso de relaves filtrados y la optimización del diseño geotécnico de los depósitos permiten mejorar notablemente la estabilidad y reducir los riesgos ambientales en comparación con depósitos convencionales. Investigaciones actuales sobre estabilidad de instalaciones de almacenamiento de relaves (TSF), como las desarrolladas por Zabolotnii et al. (2022), Reid & Fourie (2024) y Zheng et al. (2025), muestran que la correcta caracterización de la resistencia al corte, el control del nivel freático y la aplicación combinada de métodos de equilibrio límite y elementos finitos nos dejan obtener evaluaciones más confiables del factor de seguridad. Asimismo, estudios como los de Ma et al. (2025) resaltan que el ascenso del nivel freático puede reducir drásticamente la estabilidad del talud, lo cual refuerza la importancia del control hidráulico en depósitos actuales y modernos

- Raglan Mine (Quebec, Canadá)

Incorpora tecnologías de filtración de relaves que permiten obtener un material con mayor compacidad y mejores condiciones de estabilidad

geotécnica, reduciendo el riesgo de fallas estructurales en comparación con depósitos convencionales. Este enfoque es consistente con investigaciones que destacan la importancia de la reducción de humedad y el control de deformaciones localizadas en la estabilidad global del depósito (Zabolotnii et al., 2022). Asimismo, esta metodología contribuye a disminuir la huella ambiental del proyecto y a mejorar la eficiencia en la recuperación del agua de proceso, favoreciendo una gestión más sostenible de los relaves.

- La Coipa y Mantos Blancos (Chile),

Han adoptado sistemas de relaves filtrados y apilado en seco, logrando depósitos con bajo contenido de humedad y mayor estabilidad estructural frente a cargas operativas y condiciones sísmicas. Estas experiencias son coherentes con estudios que analizan el comportamiento sísmico y la susceptibilidad a licuefacción en depósitos de relaves (Reid & Fourie, 2024; Zheng et al., 2025), demostrando que la aplicación de tecnologías de filtración mejora el comportamiento geotécnico del depósito y facilita el cumplimiento de normativas ambientales más estrictas, promoviendo una operación minera sostenible.

- Proyectos nacionales:
  - En el contexto nacional, proyectos mineros desarrollados en el Perú han incorporado progresivamente tecnologías de relaves filtrados como respuesta a las exigencias ambientales y de seguridad. Estudios realizados en depósitos de relaves ubicados en zonas altoandinas muestran resultados similares a los obtenidos en la presente investigación, donde el incremento del volumen de almacenamiento es viable siempre que se mantengan factores de seguridad aceptables y un monitoreo continuo del comportamiento geotécnico (Gavidia, 2023; Miranda, 2024).
  - Proyecto Cerro Lindo (Ica, Perú)

En el proyecto Cerro Lindo, la Compañía Minera Milpo emplea relaves filtrados tanto para su disposición en superficie como para su uso como relleno en minería subterránea, lo que permite un mejor control del contenido de humedad y una mayor estabilidad de las estructuras construidas con este material. Esta estrategia presenta similitudes con lo señalado por Huaña (2015), quien demostró que el diseño de depósitos de relaves filtrados mejora la estabilidad física y reduce riesgos ambientales. La estrategia de compactación en capas aplicada en este proyecto evidencia que el uso de relaves filtrados contribuye significativamente a la estabilidad geotécnica de las pilas y depósitos.

- Proyecto Poderosa – Curaubamba (La Libertad, Perú)

El proyecto Poderosa – Curaubamba introduce la filtración de relaves y su disposición en depósitos controlados dentro de la cuenca de Curaubamba, creando una experiencia relevante a nivel nacional en la gestión moderna de relaves. Este enfoque se basa en la reducción del contenido de humedad del material antes de su disposición final, lo cual coincide con lo expuesto por Vilca (2019), quien señala que la tecnología de relaves espesados mejora la estabilidad física del confinamiento y reduce riesgos de infiltración y licuefacción. Asimismo, estudios como el de Quecaño (2025) muestran que la incorporación de medidas complementarias como geomembranas incrementa significativamente los factores de seguridad, resultados que son consistentes con los objetivos y conclusiones alcanzados en la presente investigación.

#### 4.3 LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS

La elaboración de la presente investigación estuvo condicionada por algunas limitaciones de carácter, exploratorio, normativo, ambiental, temporal y económico. Igual estas restricciones no invalidan los resultados del estudio,

sino que delimitan su aplicabilidad y abren oportunidades para futuras investigaciones, teniendo como base los resultados obtenidos en esta.

En relación con las limitaciones exploratorias, la investigación se basó en información proveniente de calicatas y sondajes con profundidad limitada, lo cual restringe el conocimiento detallado del comportamiento geotécnico de los estratos más profundos de la cimentación. Asimismo, se evidencia la ausencia de ensayos especiales, como ensayos dinámicos, pruebas de licuefacción, ensayos sísmicos in situ o instrumentación geotécnica avanzada.

Desde el punto de vista normativo y ambiental, el estudio se llevó a cabo tomando en cuenta la normativa vigente aplicable a los depósitos de relaves. No obstante, debido a que los estándares nacionales e internacionales en la gestión de relaves se actualizan de manera continua, es posible que en el futuro sea necesario realizar ajustes en los criterios de diseño y en los programas de monitoreo.

En relación con los plazos y los costos, la investigación se desarrolló dentro de un cronograma y un presupuesto previamente establecidos, lo que influyó en la cantidad de exploraciones realizadas, así como en el número de ensayos de laboratorio y campañas de campo ejecutadas. Estas restricciones económicas condicionaron la cantidad y el nivel de detalle de la información geotécnica.

Como propuestas de mejora, se recomienda ampliar la cobertura espacial de futuras investigaciones mediante la ejecución de un mayor número de sondajes y exploraciones geotécnicas, Asimismo, se sugiere incorporar ensayos especiales y sistemas de monitoreo geotécnico continuo, como piezómetros, inclinómetros y control de deformaciones, que permitan evaluar el comportamiento del depósito en el tiempo y bajo diferentes condiciones operativas.

Finalmente, la implementación de estas mejoras contribuiría a fortalecer la confiabilidad de los resultados, optimizar el diseño del depósito y garantizar niveles más altos de seguridad geotécnica y ambiental en el incremento del volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco – Zona B.

#### 4.4 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACIÓN

Con el propósito de garantizar la estabilidad física del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) durante la ejecución de las etapas 3 y 4, se plantea la implementación de un enrocado estructural como alternativa de refuerzo del talud aguas abajo. Esta propuesta surge a partir del análisis de estabilidad realizado mediante el software SLIDE 2D, cuyos resultados evidencian la necesidad de optimizar la configuración del dique para permitir el incremento de altura y volumen de almacenamiento sin comprometer los factores de seguridad.

En ese contexto, la propuesta geotécnica se estructura considerando los parámetros de tecnología, configuración, alturas y objetivos, los cuales permiten describir de manera integral los aspectos técnicos y su justificación dentro del marco de la presente investigación. La siguiente tabla sintetiza dichos elementos y su relación con las características de estabilidad y diseño adoptados en la tesis.

**Tabla 24***Propuesta geotécnica para la ejecución de las etapas 3 y 4 del proyecto.*

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle de la propuesta</b>	<b>Justificación de la tesis</b>
<b>Tecnología</b>	Implementación de un enrocado estructural como refuerzo del dique del depósito de relaves filtrados para las etapas 3 y 4.	El uso de enrocado mejora la estabilidad física del dique al incrementar la resistencia al corte y favorecer el drenaje, alineándose con el objetivo de optimización geotécnica del depósito.
<b>Configuración</b>	Colocación del enrocado en el talud aguas abajo, integrándolo con el dique existente y el relave filtrado compactado.	Esta configuración permite redistribuir esfuerzos, reducir deformaciones y aumentar los factores de seguridad sin modificar sustancialmente el diseño original del depósito.
<b>Alturas</b>	Incremento progresivo de la altura del dique mediante recrecimientos controlados durante las etapas 3 y 4, apoyados en el enrocado.	El aumento de altura es necesario para incrementar el volumen de almacenamiento, siendo indispensable garantizar la estabilidad física e hidráulica del depósito.
<b>Objetivos</b>	Incrementar el volumen de almacenamiento del depósito manteniendo condiciones adecuadas de estabilidad física e hidráulica.	La propuesta responde directamente al objetivo general de la tesis, demostrando que es posible ampliar la capacidad del depósito sin comprometer la seguridad ni el cumplimiento normativo.

#### **4.4.1 Plan de implementación de la propuesta geotécnica**

##### Fase 1. Evaluación y preparación técnica

En esta fase inicial se realiza la revisión integral de la geometría actual del dique y de las condiciones geotécnicas existentes en el depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B). Se analizan los resultados generados en la modelación de estabilidad mediante SLIDE 2D, verificando los factores de seguridad para las etapas 3 y 4. Asimismo, se definen los parámetros geotécnicos del enrocado, tales como peso unitario, ángulo de fricción y características granulométricas, asegurando su compatibilidad con el diseño

estructural del dique. Finalmente, se valida que la propuesta cumpla con la normativa vigente aplicable a depósitos de relaves, garantizando su viabilidad técnica antes de la ejecución.

#### Fase 2. Preparación del área y fundación

Esta fase comprende la preparación del talud aguas abajo donde se implementará el enrocado estructural. Se realizan trabajos de limpieza, conformación superficial y, de ser necesario, excavaciones de regularización en el pie del dique para garantizar una base estable y segura. Posteriormente, se efectúa la compactación de la fundación y la constatación de su capacidad portante. En caso de requerirse, se implementan sistemas de drenaje en la base para mejorar el comportamiento hidráulico y mitigar acumulaciones de presión de poros que puedan afectar la estabilidad.

#### Fase 3. Colocación y conformación del enrocado

Durante esta etapa se ejecuta la colocación del enrocado estructural como elemento de refuerzo del talud aguas abajo. El material es transportado y dispuesto en capas controladas, cuidando que cumpla con las especificaciones granulométricas y de resistencia establecidas en el diseño. Se realiza el control topográfico permanente para garantizar que la geometría final del talud coincida con la configuración presentada en SLIDE 2D. Esta fase es fundamental, ya que el enrocado actúa como elemento estabilizador, incrementando la resistencia al corte y mejorando el drenaje interno del dique ante posibles deslizamientos.

#### Fase 4. Recrecimiento del dique – Etapas 3 y 4

Una vez ejecutado el enrocado, se procede al recrecimiento progresivo del dique correspondiente a las etapas 3 y 4 del proyecto. Este incremento de altura se realiza de manera controlada, mediante la colocación y compactación de relave filtrado por capas, integrándolo por encima del nivel

superior del enrocado estructural. Este proceso apoya a aumentar el volumen de almacenamiento del depósito manteniendo las características adecuadas de estabilidad física e hidráulica, conforme a los factores de seguridad conseguido en el análisis de estabilidad.

#### Fase 5. Monitoreo y control geotécnico

De manera paralela y posterior a la ejecución, se implementa un programa de monitoreo geotécnico para monitorear el comportamiento del dique reforzado. Se monitorean posibles desplazamientos del talud, variaciones en el nivel freático y cambios en las presiones de poros. Asimismo, se realizan inspecciones técnicas periódicas del enrocado para verificar que su integridad estructural siga óptima. Esta fase permite contrastar el comportamiento real del depósito bajo las condiciones proyectada, asegurando la estabilidad a mediano y largo plazo.

#### **4.4.2 Modelamiento estructural**

El modelamiento estructural del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) se diseñó con el objetivo de analizar el comportamiento integral del sistema conformado por el dique de contención, el relave filtrado compactado, el material de préstamo y el suelo de fundación, bajo diferentes escenarios de carga que se aplicaron a la presa de relaves, bajo un análisis estático y sísmico.

La simulación considera la geometría optimizada propuesta para el incremento de volumen de almacenamiento, incorporando las etapas de recremento y las condiciones reales del terreno natural. Asimismo, se asignaron parámetros geotécnicos obtenidos de ensayos de laboratorio y estudios previos, garantizando la representatividad del modelo.

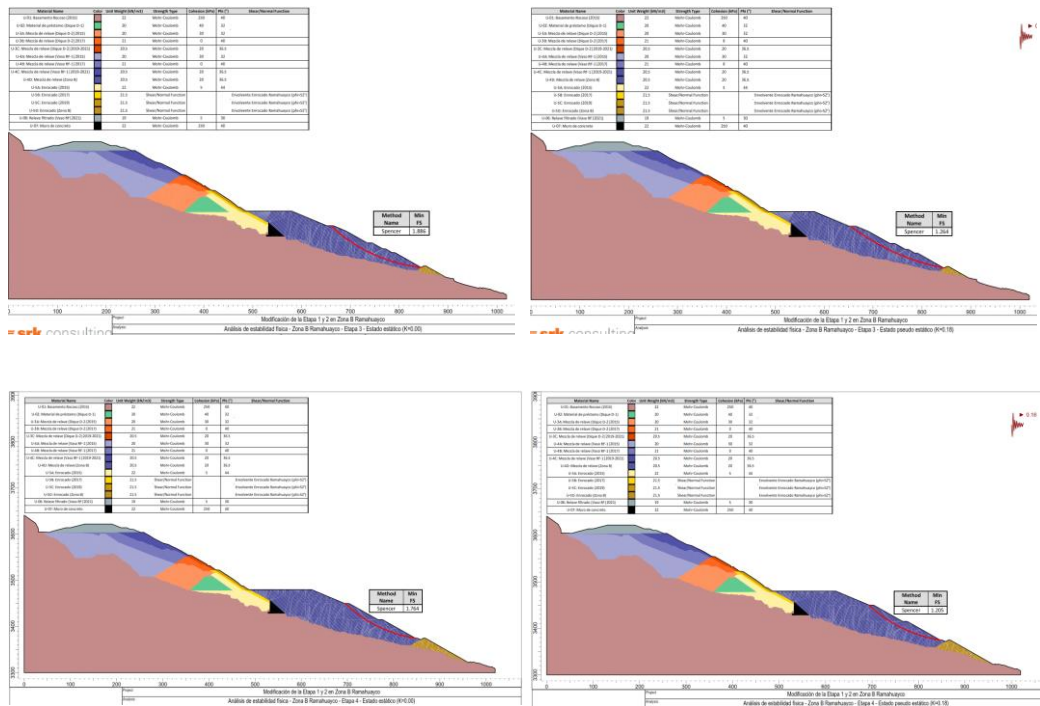
La **figura 10** que se presentan a continuación muestran la configuración geométrica adoptada, la discretización del dominio mediante malla

numérica, la distribución de materiales, las condiciones de contorno y los resultados obtenidos en términos de desplazamientos, tensiones y superficies críticas potenciales.

El análisis estructural evidencia que el comportamiento del depósito responde de manera coherente con la configuración geométrica y las propiedades mecánicas asignadas. Las mayores concentraciones de esfuerzos se localizan en la base del dique y en la zona de contacto con la fundación, lo cual es consistente con la transferencia de cargas gravitacionales y el efecto del recrecimiento progresivo.

**Figura 10**

*Análisis pseudoestático de la estabilidad del talud de la represa en el Slide.*



Los desplazamientos obtenidos muestran un patrón controlado y progresivo, sin desarrollo de mecanismos de falla generalizada. En condición pseudoestática, si bien se incrementan los esfuerzos y deformaciones, estos permanecen dentro de rangos admisibles conforme a los criterios de diseño

establecidos por la normativa nacional e internacional aplicable a depósitos de relaves filtrados.

En conjunto, el modelamiento estructural confirma que la alternativa geotécnica propuesta permite incrementar el volumen de almacenamiento manteniendo condiciones adecuadas de estabilidad física e hidráulica, validando técnicamente la optimización planteada para el depósito Ramahuayco (Zona B).

En la **figura 10** se muestra el diseño final de la etapa 3 y 4, donde se muestra la sección de las etapas propuestas del enrocado y el dique de compactación.

#### **4.4.3 Diseño de propuesta**

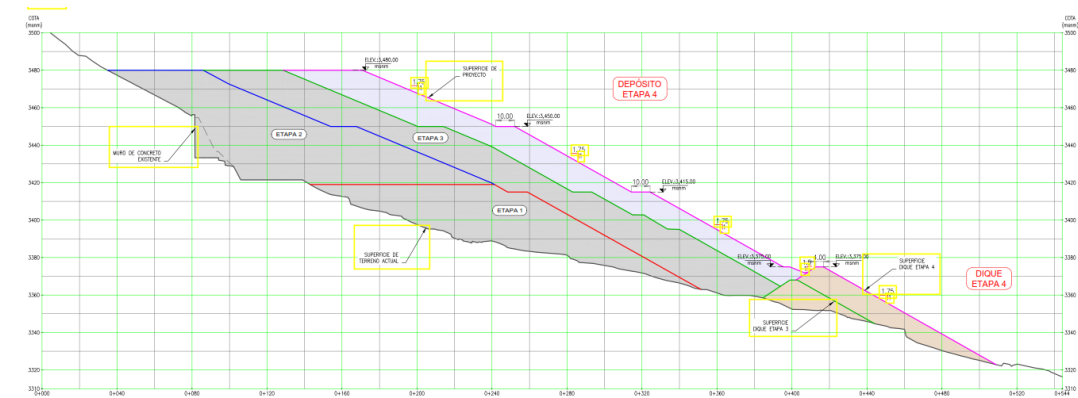
El diseño de la propuesta de optimización geotécnica para el depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) se fundamenta en la necesidad de incrementar el volumen de almacenamiento manteniendo los criterios de estabilidad física e hidráulica establecidos en la normativa vigente.

La alternativa planteada considera la incorporación de nuevas etapas de recrecimiento estructural, las cuales han sido definidas a partir del análisis geotécnico, modelamiento estructural y evaluación de estabilidad desarrollados en los apartados anteriores. Estas etapas buscan mejorar la configuración geométrica del depósito, optimizar la distribución de cargas y garantizar un comportamiento seguro ante condiciones estáticas y sísmicas.

En la siguiente figura se muestra el esquema general de las etapas del proyecto, destacando la adición de las etapas propuestas como parte del proceso de optimización.

## Figura 11

*Diseño de la propuesta para la ampliación de depósito de relaves.*



Como se observa en la **figura 11**, la propuesta contempla la ampliación progresiva del depósito mediante la incorporación de nuevas etapas de recrecimiento, integradas de manera secuencial al diseño existente. Esta estrategia permite aumentar la altura operativa y el volumen útil sin generar cambios abruptos en la geometría global del sistema.

Las etapas propuestas han sido dimensionadas considerando la capacidad portante de la fundación, el comportamiento del relave filtrado compactado y la variables de seguridad obtenidos en el análisis estructural. Asimismo, la configuración adoptada favorece el control de drenaje interno y la reducción de presiones de poros, elementos clave para mantener la estabilidad del talud aguas arriba y aguas abajo.

Como consecuencia, el diseño propuesto no solo incrementa la capacidad de almacenamiento, sino que lo hace bajo un el soporte técnico sustentado en criterios de seguridad, eficiencia constructiva y sostenibilidad operativa de manejo de relaves, alineado con los objetivos de la presente investigación.

## 4.5 EVALUACIÓN DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO

### 4.5.1 Costos, inversión inicial, final

La propuesta de recrecimiento por etapas para el depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) ha sido planteada bajo un enfoque de optimización técnico-económica, poniendo en primer lugar soluciones que incrementen la capacidad de almacenamiento sin generar incrementos en los costos de construcción.

Desde la perspectiva económica, la alternativa presenta las siguientes ventajas:

- Aprovechamiento de infraestructura existente, reduciendo inversiones iniciales.
- Uso de materiales disponibles en cantera cercana, minimizando costos de transporte.
- Ejecución por etapas, permitiendo distribuir la inversión en el tiempo.
- Reducción de costos asociados a posibles fallas o medidas correctivas futuras.

El esquema de recrecimiento progresivo permite que la inversión se realice de manera escalonada, alineándose con el crecimiento operativo del proyecto y evitando desembolsos concentrados en una sola fase. De igual forma, al garantizar factores de seguridad adecuados, se reducen riesgos financieros unidos a contingencias geotécnicas.

En términos de comparación, la propuesta resulta más eficiente que una ampliación totalmente nueva o el traslado del depósito, opciones que implicarían mayores costos de movimiento de tierras, estudios adicionales y adecuaciones ambientales.

**Tabla 25***Costos aproximados del proyecto.*

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>	<b>Parcial \$</b>
<b>01</b>	<b>FASE 1: CAPEX</b>	<b>2,641,042.90</b>
<b>01.01</b>	<b>ZONA B - ETAPA 3</b>	<b>1,130,533.72</b>
01.01.01	OBRAS PROVISIONALES	9,447.00
01.01.02	OBRAS PRELIMINARES	92,570.81
01.01.03	SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION	396,878.95
01.01.03.01	ANCLAJE EN SUELO	8,847.39
01.01.03.02	IMPERMEABILIZACIÓN	380,019.53
01.01.04	SISTEMA DE SUBDRENAJE	79,466.20
01.01.04.01	CONFORMACION DEL SUBDREN	33,429.56
01.01.04.02	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 2"	8,525.31
01.01.04.03	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 4"	7,807.39
01.01.04.04	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 8"	11,172.63
01.01.04.05	COLOCACION DE ENROCADO TAMAÑO MAXIMO 32 CM	18,531.31
01.01.05	FILTROS	281,862.00
01.01.06	CONFORMACIÓN DE DIQUE	249,473.74
01.01.07	SISTEMA DE DRENAJE	20,835.02
<b>01.02</b>	<b>ZONA B - ETAPA 4</b>	<b>1,510,509.18</b>
01.02.01	OBRAS PROVISIONALES	11,597.70
01.02.02	OBRAS PRELIMINARES	95,445.24
01.02.03	SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION	257,869.24
01.02.03.01	ANCLAJE EN SUELO	7,541.28
01.02.03.02	IMPERMEABILIZACIÓN	225,546.31
01.02.04	SISTEMA DE SUBDRENAJE	34,348.00
01.02.04.01	CONFORMACION DEL SUBDREN	9,893.84
01.02.04.02	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 2"	4,487.00
01.02.04.03	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 4"	4,083.17
01.02.04.04	COLOCACION DE GRAVA TAMAÑO MAXIMO 8"	6,281.80
01.02.04.05	COLOCACION DE ENROCADO TAMAÑO MAXIMO 32 CM	9,602.19
01.02.05	FILTROS	223,561.82
01.02.06	CONFORMACIÓN DE DIQUE	621,995.11
01.02.07	SISTEMA DE DRENAJE	265,692.07
<b>02</b>	<b>FASE 2 : OPEX</b>	<b>9,035,355.24</b>
<b>02.01</b>	<b>ZONA B - ETAPA 3</b>	<b>4,728,973.72</b>
02.01.01	OBRAS PROVISIONALES	35,979.00
02.01.02	OBRAS PRELIMINARES	153,311.06
02.01.03	DEPOSITACIÓN DE MEZCLA DE RELAVE	4,539,683.66
<b>02.02</b>	<b>ZONA B - ETAPA 4</b>	<b>4,306,381.52</b>
02.02.01	OBRAS PROVISIONALES	32,622.30
02.02.02	OBRAS PRELIMINARES	144,331.43
02.02.03	DEPOSITACIÓN DE MEZCLA DE RELAVE	4,129,427.79
	<b>INCREMENTO DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES FILTRADOS RAMAHUAYCO (ZONA B) - ETAPAS 3 Y 4</b>	<b>11,676,398.14</b>

#### **4.5.2 Sostenibilidad**

La sostenibilidad de la propuesta de recrecimiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) se basa en un enfoque integral que considera de manera conjunta en aspectos técnicos, ambientales y operativos. Desde el punto de vista geotécnica, el diseño garantiza estabilidad física mediante

factores de seguridad adecuados en condición estática y pseudoestática, control de drenaje interno y adecuada interacción entre el relave filtrado, el material estructural y la fundación. Este enfoque permite reducir la probabilidad de fallas progresivas y asegura un comportamiento estructural predecible en el tiempo.

En el aspecto ambiental, la propuesta prioriza el aprovechamiento de la infraestructura existente, evitando la necesidad de intervenir nuevas áreas y reduciendo así el impacto sobre el entorno natural. Asimismo, la implementación de sistemas de drenaje superficial y subterráneo facilita el control del agua y ayuda a prevenir efectos negativos asociados a lluvias intensas u otros eventos climáticos. Además, el recrecimiento por etapas permite realizar un seguimiento continuo del comportamiento del depósito.

Desde el ámbito operativo, el esquema por etapas facilita la continuidad de las actividades sin interrupciones significativas, permitiendo una mejor planificación del manejo de relaves y manteniendo coherencia con el crecimiento productivo del proyecto. En conjunto, estos aspectos permiten consolidar una alternativa técnicamente segura y responsable del medio ambiente.

#### **4.5.3 Viabilidad a largo plazo**

La viabilidad a largo plazo de la propuesta se orienta en la estabilidad estructural comprobada mediante el modelamiento geotécnico y en un diseño compatible con las futuras etapas de operación y cierre. La geometría modelada permite aumentar crecientemente la capacidad de almacenamiento sin afectar la estabilidad global del depósito, manteniendo niveles de seguridad acordes con la normativa vigente.

Asimismo, el diseño modular brinda la alternativa de realizar ajustes según el comportamiento observado durante la operación o ante cambios en las condiciones del relave. La adecuada distribución de cargas y el control de presiones internas apoyan a mantener un desempeño estable en el tiempo y a reducir posibles riesgos.

En conjunto, la propuesta no solo atiende las necesidades actuales, sino que también asegura una gestión segura, eficiente y sostenible del depósito a lo largo de su vida útil y en su etapa de cierre.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se concluye que la revisión de los estudios geológicos y geotécnicos realizados en la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) permitió conocer las condiciones de cimentación, así como las propiedades mecánicas del relave filtrado y características del material estructural. Los parámetros determinados constituyen una base técnica confiable para el análisis de recrecimiento, evidenciando que el terreno de fundación presenta condiciones favorables para soportar el incremento progresivo de carga asociado al aumento de la capacidad de almacenamiento, siempre que se mantenga un control adecuado de compactación y sistema de drenaje.

Por otro lado, el análisis de los estudios hidrológicos permitió comprender las condiciones de escorrentía superficial, eventos más elevados de precipitación y las condiciones del drenaje en el área de estudio. Por eso, se consideró que el sistema requiere un adecuado control hidráulico para prevenir infiltraciones excesivas y acumulación de agua en el cuerpo del depósito. La incorporación de medidas de drenaje tanto superficial y subterráneo dentro del diseño aportan a mantener condiciones seguras, incluso frente a situaciones climáticas extremas, sin afectar la estabilidad del sistema.

Finalmente, el análisis de estabilidad física, desarrollado mediante modelamiento geotécnico en condiciones estáticas y pseudoestáticas, confirmó que el incremento del volumen de almacenamiento es técnicamente factible, siempre que se incluya un refuerzo estructural en el talud aguas abajo. La incorporación del enrocado permite mejorar notablemente los factores de seguridad, favorece una mejor distribución de esfuerzos y reduce el riesgo de falla general. En consecuencia, se concluye que el depósito Ramahuayco (Zona B) puede ser optimizado mediante recrecimientos controlados, garantizando su estabilidad y un operatividad segura a lo largo del tiempo.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda ampliar la cobertura de exploraciones geotécnicas en futuras etapas del proyecto, incluyendo ensayos complementarios que permitan reducir información asociadas a la variabilidad del macizo de fundación. También, se recomienda implementar puntos de instrumentación geotécnica permanente para llevar un control de asentamientos, desplazamientos y presiones intersticiales, que contribuye a una evaluación permanente del desempeño del sistema, facilitando detectar oportunamente cualquier condición insegura o alarmante a lo largo del tiempo.

Se recomienda mejorar el sistema de drenaje superficial y subterráneo, teniendo en cuenta escenarios de precipitación extrema asociados a variabilidad climática. Es esencial mantener un programa de mantenimiento periódico de cunetas, drenes y canales de evacuación, a fin de preservar la eficiencia hidráulica del sistema durante toda la vida útil del depósito.

Se recomienda ejecutar el recrecimiento por etapas de manera progresiva y controlada, verificando en cada fase el cumplimiento de los factores de seguridad establecidos en el diseño. Asimismo, se sugiere actualizar periódicamente el modelo de estabilidad incorporando datos reales de operación, garantizando la viabilidad técnica y la seguridad a largo plazo del depósito.

## REFERENCIAS

- Aguirre Flores, O. F. (2020). *Estabilidad Física del Depósito de Relaves Filtrados y Medidas De Control Durante la Construcción del Dique en la Mina Catalina Huanca - Ayacucho*. Universidad César Vallejo.
- Araya Cortés, C. (2025). La Nueva Norma para Relaves. *InduAmbiente*, 11–14. [https://issuu.com/induambiente1/docs/revista\\_induambiente\\_n\\_193](https://issuu.com/induambiente1/docs/revista_induambiente_n_193)
- Australian National Committee on Large Dams, (ANCOLD). (2019). *Guidelines on Tailings Dams – Planning, Design, Construction, Operation and Closure*.
- Cacciuttolo Vargas, C., & Pérez Campomanes, G. (2022). Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution. *Minerals*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/min12070889>
- Cairo Hurtado, J. (2013). *Evaluacion Geotecnia Del Depósito de Relaves de la Planta Concentradora de de Huari- La Oroya*. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2156/CairoHurtado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Capone Barraza, M. E. (2016). *FILTROS DE PRENSA PARA RELAVES* [Tesis de Magister]. Universidad de Chile.
- Castro, G. (2012). Diccionario Minero. *Otros Mundos*, 26, 1–40. <https://otrosmundoschiapas.org/el-escaramujo-26-diccionario-minero-2>
- Chávez, M. (2022). *Análisis dinámico de estabilidad de un depósito de relaves* [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chilon Chilon, R. (2025). Análisis de relaves filtrados para la estabilización física en la conformación de una presa. *Revista de Investigación APORTE SANTIAGUINO Ingeniería e Innovación*, 18(1), 87–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1222>
- Contreras, C. (2021). *Ampliación de la Presa De Relaves Pallancata en la Fase 3, Para Incrementar su Capacidad de Almacenamiento, en la Empresa Minera Ares-S.A.C. Ayacucho-2020*. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac.

- Cruz, L., Botero, E., Mánica, M., & Arroyo, M. (2025). Strength and critical state characteristics of lime-stabilised mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1–22. <https://doi.org/10.1139/cgj-2025-0070>
- D.S. N° 024-2016-EM Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional En Minería, 186 (2016).
- D.S. N° 031-2023-EM Reglamento de La Ley de Adecuación Del Transporte y Disposición Final de Relave a Las Empresas Que Realizan Actividades Minero-Metalúrgicas., 1 (2023).
- Espinoza, C. (2025). *Caracterización de la Resistencia al Corte en Suelos Residuales Mediante Ensayos de Laboratorio y su Influencia en la Estabilidad de Presas de Relave*. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Espinoza, M., & Vega, M. (2024). *Análisis de Confiabilidad de Estabilidad de un depósito de Relaves de una Mina ubicada al Sur del Perú* [Trabajo de Suficiencia, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/682803>
- France, J. W. (2024). *La licuefacción estática debe considerarse como un modo de falla potencial para las presas que tienen arenas sueltas o limos en sus terraplenes o cimientos*. ASDSO Lecciones Aprendidas. <https://damfailures.org/lessons-learned/static-liquefaction-should-be-considered-as-a-potential-failure-mode-for-dams-that-have-loose-sands-or-silts-in-their-embankments-or-foundations>
- Gama, F. F., Mura, J. C., Paradella, W. R., & de Oliveira, C. G. (2020). Deformations prior to the brumadinho dam collapse revealed by sentinel-1 insar data using sbas and psi techniques. *Remote Sensing*, 12(21), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs12213664>
- García Fernández, G., & Gómez Ros, J. M. (2015). *Procedimiento de instalación, en un suelo o depósito de residuos, con elementos o compuestos contaminantes, de una barrera física multicapa para interrumpir flujos hídricos verticales* (Issue 1). <http://hdl.handle.net/10317/5491>
- Gavidia, A. (2023). *Modelamiento Geotécnico en Depósitos de Relaves Utilizando Metodología de Actualización de Parámetros*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Chile.
- Guía Ambiental Para La Estabilidad De Taludes De Depositos De Desechos Solidos

De Mina, 1 (1997).

Huaman, J., & Barrios, J. (2024). *Comportamiento hidráulico y el análisis del riesgo geotécnico para la adaptación y optimización del depósito de relaves Ocroyoc en la Unidad Minera Paragsha, 2024*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Continental.

Huaña Gonzales, O. (2015). *Diseño de depósitos de relaves filtrados* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>

International council of Mining and Metals, (ICMM). (2025). *Tailings Management* (Issue February).

Khalilzad, M., Gabr, M. A., & Hynes, M. E. (2015). Assessment of remedial measures to reduce exceedance probability of performance limit states in embankment dams. *Computers and Geotechnics*, 67, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.02.010>

Komljenovic, D., Stojanovic, L., Malbasic, V., & Lukic, A. (2020). A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(5), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.007>

Larenas Mora, C. A. (2024). *Análisis De Estabilidad Química Y Física De Morteros Con Sustitución De Arena Por Material* [Tesis para Título]. Universidad de Concepción.

Ley N° 31211 - Ley de Adecuación Del Transporte y Disposición Final de Relave a Las Empresas Que Realizan Actividades Minero-Metalúrgicas., 1 (2021).

Łydźba, D., Róžański, A., Kawa, M., Masłowski, M., Rainer, J., Sobótka, M., & Stefanek, P. (2024). Reliability-oriented segmentation of sublayers in geologically uncertain substrate: A case study of the Żelazny Most TSF. *Engineering Geology*, 333(October 2023). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107501>

Ma, L., Zhang, C., Ma, C., & Han, X. (2025). Study on the collapse mechanism of slopes containing weak interlayers due to rising water level. *Results in Engineering*, 26(March), 104684. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104684>

Miranda, V. (2024). *Efecto de la Variabilidad Espacial de las Propiedades Geotécnicas en la Estabilidad Física de un Tranque de Relaves*. [Tesis de Pregrado]. Universidad de Chile.

Ministerio de Minas y Energía, (MENERGIA). (2021). *Lineamientos Técnicos de*

*Política de Buenas Prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves.*

[https://www.minenergia.gov.co/documents/9582/Cartilla\\_Lineamientos\\_Presas\\_Relaves.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/9582/Cartilla_Lineamientos_Presas_Relaves.pdf)

Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, (MVCS). (2020). E 050 - Suelos y Cimentaciones. In *Resolución Ministerial N° 048-97-MTC/15.VC del 27 de enero de 1997*. <http://www.jorgealvahurtado.com/files/N.T.E. E 050 - Suelos y Cimentaciones.pdf>

Monteiro, L. S. V. E., Bandarra, B. S., Quina, M. J., & Coelho, P. A. L. F. (2024). A multidisciplinary evaluation of mixtures of municipal solid waste incineration bottom ash and mine tailings for sustainable geotechnical solutions. *Construction and Building Materials*, 455(November), 139139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139139>

Morgenstern, N., Vick, S., & Van Zyl, D. (2015). Report on Mount Polley tailings storage facility breach. In *Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel* (Vol. 91, Issue June).

Muñoz, M. (2024). *Optimización de la Gestión del Depósito de Relaves en una Unidad Minera a Través de la Implementación de un Sistema de Filtración: Propuesta de Mejora para Incrementar la Eficiencia en la Operación Minera en Cerro de Pasco - 2021*. [Universidad Continental]. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16063/4/IV\\_FIN\\_108\\_TE\\_Taco\\_Huanqui\\_2024.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16063/4/IV_FIN_108_TE_Taco_Huanqui_2024.pdf)

NTP 339.150 - Descripción e Identificación de Suelos. Procedimiento Visual - Manual, 43 (2015). <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>

Padilla, N., & Vilcas, G. (2024). *Análisis de estabilidad del talud del recrecimiento de un depósito de relaves en pulpa ubicado en Puno* [Trabajo de Suficiencia, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/682796>

Quecaño Yaja, B. (2025). *Análisis de Infiltración y Estabilidad del Depósito de Relaves N°2 en el Recrecimiento del Año 2021-Unidad Minera Huancapetí-Recuay*.

Quecaño Yaja, B. M. (2025). *Análisis De Infiltración Y Estabilidad Del Depósito De Relaves N° 2 En El Recrecimiento Del Año 2021- Unidad Minera Huancapetí- Recuay* [Tesis de Título, Universidad Nacional Jorge Basadre

Grohmann].

<http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/1073%0Ahttp://www.unjbg.edu.pe/institucion/historia.php>

Quispe, J. (2023). *Diseño Geotecnico Para La Construcción Del Depósito De Relaves N° 3 En La Planta Procesadora Remega, Chala – Caraveli - Arequipa* [Trabajo de Suficiencia, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/20581>

Reid, D., & Fourie, A. (2024). Development and outcomes of a tailings slope stability comparative design exercise. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(8), 1683–1704. <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0065>

Rios, G., & Villena, G. (2024). *Análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite y propuesta de modificaciones para la optimización del comportamiento estático y dinámico de la Presa de Relaves La Esperanza en Vitoc, Junín* [Trabajo de Suficiencia]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Rojas, D. (2021). *Desafíos En La Normativa Que Afecta a La Pequeña Minería Para El Desarrollo De Depositos De Relaves Mineros* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/182999/Desafios-en-la-normativa-que-afecta-a-la-pequena-mineria-para-el-desarrollo-de-depositos-de.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Silva Rotta, L. H., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90(January). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>

Soria, W. (2025). *Análisis geotécnico para el diseño de un depósito de top soil en la unidad minera Animón, distrito de Huallay, región Pasco, 2024*. [Trabajo de Suficiencia]. Universidad de Huanuco.

Ticse Vila, K., & Jara Rojas, C. Y. (2022). *Separacion solidos – liquidos en espesadores de relaves de la minera Shouxin S.A. 2020* [Tesis de Título].

Vilca Vasquez, C. (2019). *Respuesta de la Estabilidad Física del Confinamiento de Relaves de Cobre con la Innovación de la Deposición de Relaves Espesados o en Pasta*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa Escuela de Posgrado.

Villanueva Jimenez, A. M. (2015). *Simulación numérica de la construcción del*

*depósito de relaves filtrados Ramahuayco y validación de los parámetros del modelo constitutivo representativo.* Universidad Nacional de Ingeniería.

Zabolotnii, E., Morgenstern, N. R., & Wilson, G. W. (2022). Mechanism of failure of the Mount Polley Tailings Storage Facility. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(8), 1503–1518. <https://doi.org/10.1139/cgj-2021-0036>

Zheng, J., Bonin, M., Mohammad, K., Nousiainen, J., Masengo, E., & Shaigetz, M. (2025). Stability analysis of tailings dams using limit equilibrium and finite element methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 178(4), 456–468. <https://doi.org/10.1680/jgeen.24.00319>

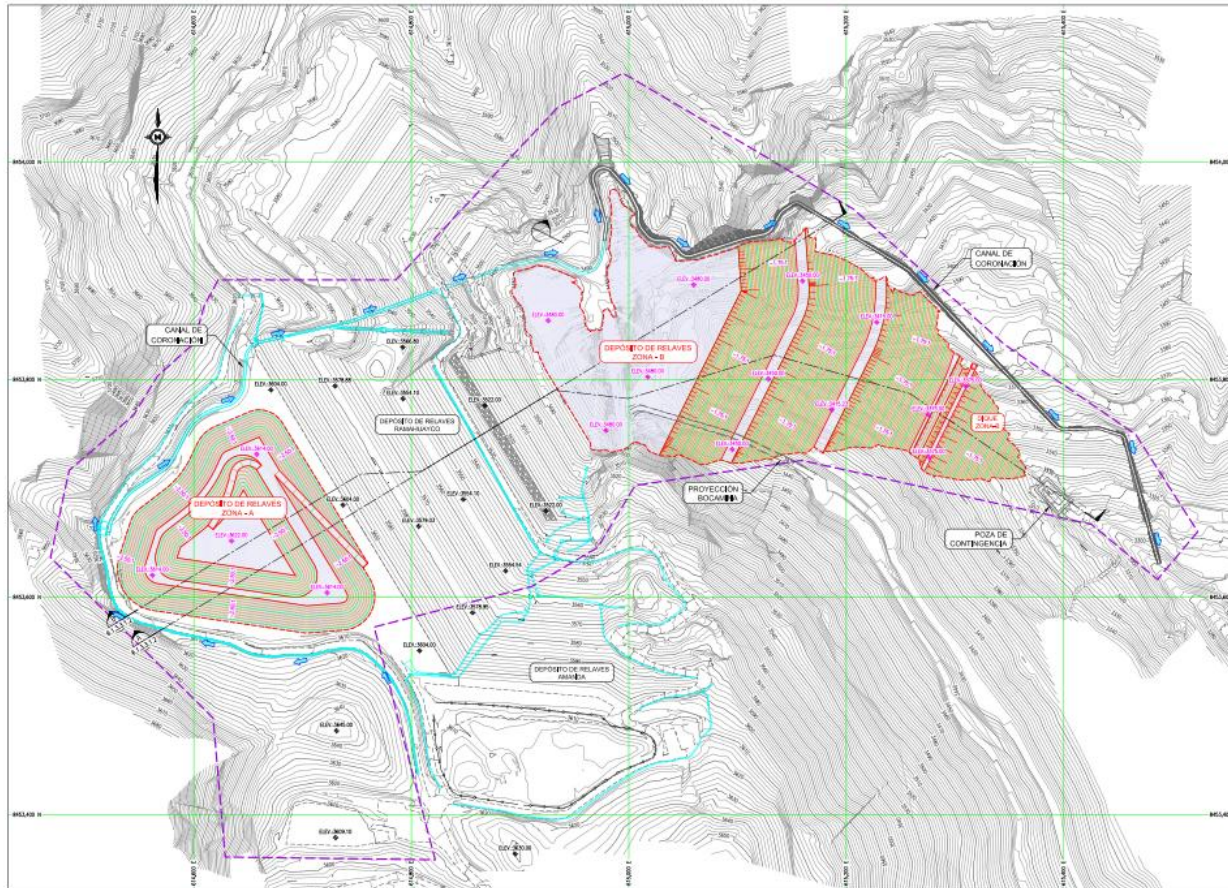
## Apéndice 1

### Matriz de consistencia del informe final de tesis.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES/DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA	RECOMENDACIONES
<p><b>1. INTERROGANTE PRINCIPAL</b></p> <p>¿Qué alternativa geotécnica permite incrementar de manera segura y eficiente el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B), garantizando su estabilidad física e hidráulica, Ayacucho 2025?</p> <p><b>2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS</b></p> <p>a) ¿Cuáles son las condiciones geológicas y geotécnicas actuales del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B) y cómo influyen en la posibilidad de incrementar su volumen de almacenamiento?</p> <p>b) ¿Cómo afectan las condiciones hidrológicas de la zona la estabilidad física del depósito ante escenarios de incremento de volumen?</p> <p>¿Qué alternativa geotécnica presenta el mejor desempeño estructural e hidráulico para incrementar de forma segura el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (Zona B)?</p>	<p><b>1. OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Analizar el depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025</p> <p><b>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b></p> <p>a) Evaluar los estudios geológicos y geotécnicos de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.</p> <p>b) Analizar los estudios hidrológicos de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.</p> <p>Analizar la estabilidad física de la zona de estudio del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) para el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.</p>	<p><b>1. HIPÓTESIS GENERAL</b></p> <p>Si se realiza un análisis adecuado del depósito de relaves filtrados Ramahuayco (zona - B) entonces será posible el incremento de su volumen de almacenamiento, Ayacucho 2025.</p> <p><b>2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b></p> <p>a) Si se evalúan adecuadamente los estudios geológicos y geotécnicos de la zona, entonces se podrán determinar las características del terreno que permitan sustentar un incremento seguro en el volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados.</p> <p>b) Si se analizan correctamente los estudios hidrológicos de la zona, entonces se podrán identificar los riesgos asociados al escurrimiento superficial y subterráneo para establecer medidas de control hídrico que permitan mantener la estabilidad y operatividad del depósito ante el incremento de su volumen.</p> <p>Si se realiza un análisis integral de la estabilidad física de la zona del depósito, entonces será posible verificar que las condiciones geotécnicas permiten un incremento de volumen sin comprometer la seguridad estructural ni el entorno ambiental.</p>	<p><b>Variable independiente: Optimización geotécnica del depósito de relaves filtrados</b></p> <p><b>Dimensión 1: Geológica y geotécnica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de material geológico presente (litología, grado de alteración y fracturamiento).</li> <li>• Propiedades físicas y mecánicas del suelo y del relave (cohesión, ángulo de fricción, densidad seca, humedad óptima).</li> <li>• Nivel de compactación de los relaves filtrados.</li> <li>• Presencia de fallas geológicas, zonas de debilidad estructural o discontinuidades.</li> <li>• Capacidad portante y comportamiento de la fundación.</li> </ul> <p><b>Dimensión 2: Hidrológica e hidrogeológica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel freático y profundidad del agua subterránea en el entorno del depósito.</li> <li>• Escurrimiento superficial y drenaje natural de la zona.</li> <li>• Capacidad de drenaje del sistema de filtración del depósito.</li> <li>• Influencia de precipitaciones extremas o eventos hidrometeorológicos.</li> <li>• Riesgo de infiltración hacia la base o los taludes del depósito.</li> </ul> <p><b>Dimensión 3: Estabilidad física y estructural</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Factor de seguridad global frente a deslizamientos.</li> <li>• Estabilidad de taludes bajo condiciones secas y saturadas.</li> <li>• Desplazamientos esperados o deformaciones máximas tolerables.</li> <li>• Riesgo de licuefacción o falla por esfuerzos cortantes.</li> <li>• Comportamiento del depósito ante cargas dinámicas o eventos sísmicos.</li> </ul> <p><b>Dimensión 4: Diseño y control constructivo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración geométrica del depósito (altura, pendiente, bermas y coronamiento).</li> <li>• Calidad y compactación del material en cada etapa de recrecimiento.</li> <li>• Cumplimiento de parámetros de diseño geotécnico según normativa vigente.</li> <li>• Resultados de control de calidad (densidad in situ, humedad, granulometría).</li> <li>• Implementación de medidas de refuerzo o drenaje complementarias.</li> </ul> <p><b>Variable dependiente: Incremento del volumen de almacenamiento del depósito de relaves filtrados</b></p> <p><b>Dimensión 1: Capacidad de almacenamiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen actual disponible y volumen proyectado tras la optimización.</li> <li>• Altura de crecimiento o recrecimiento segura del depósito.</li> <li>• Diseño geométrico y límites de contención del depósito.</li> <li>• Relación entre densidad de relaves y espacio requerido.</li> <li>• Proyección de vida útil adicional del depósito con el incremento propuesto.</li> </ul> <p><b>Dimensión 2: Seguridad estructural y operativa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Factor de seguridad global posterior al incremento volumétrico.</li> <li>• Cumplimiento de criterios técnicos y normativos de estabilidad.</li> <li>• Monitoreo de deformaciones o desplazamientos en zonas críticas.</li> <li>• Condiciones del drenaje y control del nivel piezométrico.</li> <li>• Riesgo residual ante condiciones sísmicas o hidrológicas extremas.</li> </ul> <p><b>Dimensión 3: Eficiencia técnica y económica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación costo-beneficio de la alternativa geotécnica propuesta.</li> <li>• Eficiencia en el uso del espacio disponible dentro del área de concesión.</li> <li>• Reducción de costos de mantenimiento o recrecimiento futuro.</li> <li>• Mejora en la operatividad del sistema de relaves filtrados.</li> </ul>	<p><b>- Tipo de Investigación</b></p> <p>Aplicada</p> <p><b>- Diseño de la Investigación</b></p> <p>No experimental de corte transeccional</p> <p><b>- Ámbito de Estudio</b></p> <p>Depósito de relaves filtrados Ramahuayco</p> <p><b>- Población</b></p> <p>Total de puntos de exploración del depósito de relaves</p> <p><b>- Muestra</b></p> <p>Mínimo tres puntos</p> <p><b>- Técnicas de Recolección de datos</b></p> <p>Observación</p> <p><b>- Instrumentos</b></p> <p>Fichas de observación de campo y laboratorio</p>	<p>1. Se recomienda ampliar la cobertura de exploraciones geotécnicas en futuras etapas del proyecto, incorporando ensayos complementarios que permitan reducir incertidumbres asociadas a la variabilidad del macizo de fundación. Asimismo, se sugiere implementar instrumentación geotécnica permanente para monitorear asentamientos y presiones intersticiales durante el recrecimiento.</p> <p>2. Se recomienda reforzar el sistema de drenaje superficial y subterráneo, considerando escenarios de precipitación extrema asociados a variabilidad climática. Es fundamental mantener un programa de mantenimiento periódico de cunetas, drenes y canales de evacuación, a fin de preservar la eficiencia hidráulica del sistema durante toda la vida útil del depósito.</p> <p>3. Se recomienda ejecutar el recrecimiento por etapas de manera progresiva y controlada, verificando en cada fase el cumplimiento de los factores de seguridad establecidos en el diseño. Asimismo, se sugiere actualizar periódicamente el modelo de estabilidad incorporando datos reales de operación, garantizando la viabilidad técnica y la seguridad a largo plazo del depósito.</p>

## Apéndice 2

### Diseño Geométrico Planta



PLANTA  
1/1000

**LEYENDA**

	TOPOGRAFIA TERRENO EXISTENTE
	TOPOGRAFIA TERRENO PROYECTADO
	AREA DE CORTE
	AREA DE RELLENO
	PROYECCION ESTRUCTURAL
	ACCESO EXISTENTE
	CRISTO
	BASE DE FUNDACION
	DAMBA EXISTENTE
	CONTINGENCIA EXISTENTE
	DAMBA
	RS

- NOTAS**
- LA ESCALA SERA MEDIDA EN PUNTO EL FORMAS A-1 PARA A-2 ORDENAN EL DISEÑO
  - DIMENSIONES Y PUNTO EN METROS, SINO SE INDICAR
  - CON TODA DIMENSION INDICADA EN LOS PLANOS
  - LA TOPOGRAFIA FUE PROPORCIONADA POR EL CLIENTE EN MAPA DEL LADO SUR NO 84-182

**ESCALA GRÁFICA**  
( EN METROS )

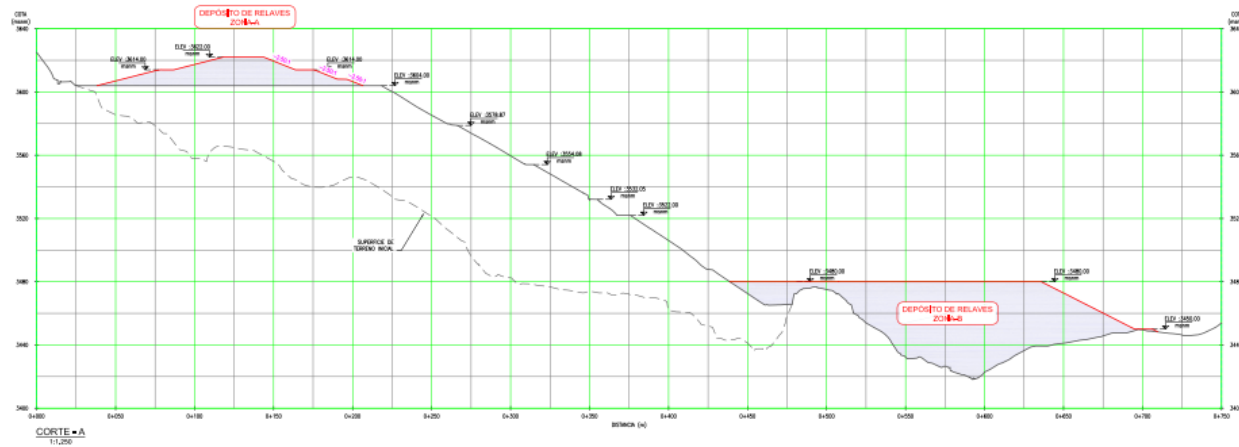
Escala 1:1.700

**CUADRO DE VOLÚMENES**

ESTACION	TIPO DE MATERIAL	VOLÚMENES	NO. DE MATERIAL
DEPÓSITO DE RELAVES ZONA A-B	RS	100.000	100.000
DEPÓSITO DE RELAVES ZONA C-D	RS	100.000	100.000
DEPÓSITO DE RELAVES ZONA E-F	RS	100.000	100.000
DEPÓSITO DE RELAVES ZONA G-H	RS	100.000	100.000
DEPÓSITO DE RELAVES ZONA I-J	RS	100.000	100.000

# Apéndice 3

## Diseño Geométrico Sección



LEYENDA	
[Light Blue Box]	ÁREA DE RELAVES
[Light Blue Box]	ÁREA DE RELLENO
[Red Line]	PROYECCIÓN ESTRUCTURAL
[Dashed Line]	SUPERFICIE DE TERRENO ACTUAL
[Dotted Line]	SUPERFICIE DE TERRENO CENSADO

**NOTAS**

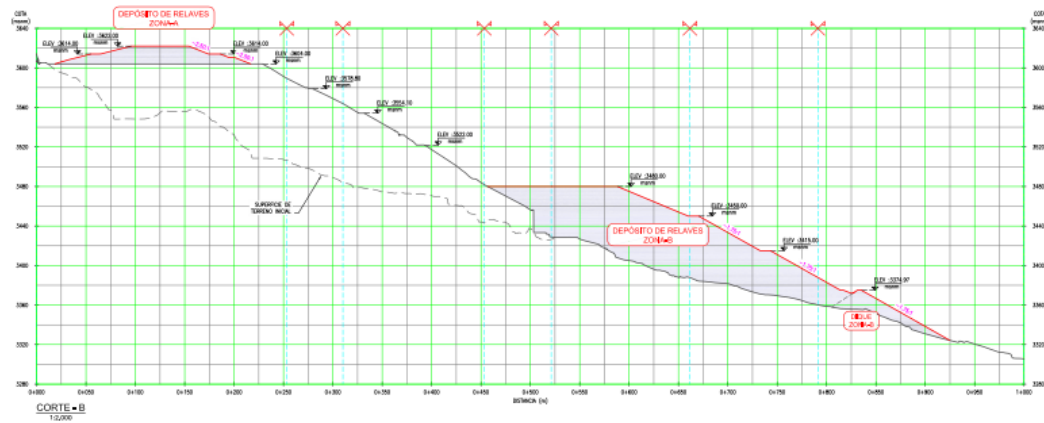
1. LA ESCALA GRÁFICA MUESTRAN ES PARA EL FORMATO A-1 PARA N.º 2 CONSIDERAR EL CORRE.
2. DIMENSIONES Y PASES EN METROS, SALVO INDICAR.
3. USAR SOLA DIMENSIONES MENCION EN LOS PLANOS.
4. LA TENDENCIA DE PROPORCIONAR POR EL CLENVE EN MANO DEL LLEDO DATUM NOS 41-195.

**ESCALA GRÁFICA**  
( EN METROS )

0 50 100 150 200 250 m  
Escala 1:2.000

**ESCALA GRÁFICA**  
( EN METROS )

0 25 50 75 100 125 150 m  
Escala 1:1.250



## Apéndice 4

### Análisis de laboratorio

## ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO

### ASTM - D422

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Víctor Fajardo - Ayacucho		
Cód. de Muestra:	CI-1	Nº de Muestra:	M-1
Profundidad (m):	0.50	Nº de Proyecto:	---
Zona:	D-2		

Tamiz	Abertura (mm)	% Acumulado
3"	76,200	100,0
2"	50,800	89,5
1 1/2"	38,100	86,6
1"	25,400	85,3
3/4"	19,050	83,8
1/2"	12,700	81,7
3/8"	9,525	80,3
Nº4	4,760	77,5
Nº10	2,000	75,3
Nº20	0,850	73,8
Nº40	0,425	72,6
Nº100	0,150	61,1
Nº200	0,075	46,3

Partículas >3" (%)	---
Grava (%)	22,5
Arena (%)	31,2
Limos y Arcillas (%)	46,3

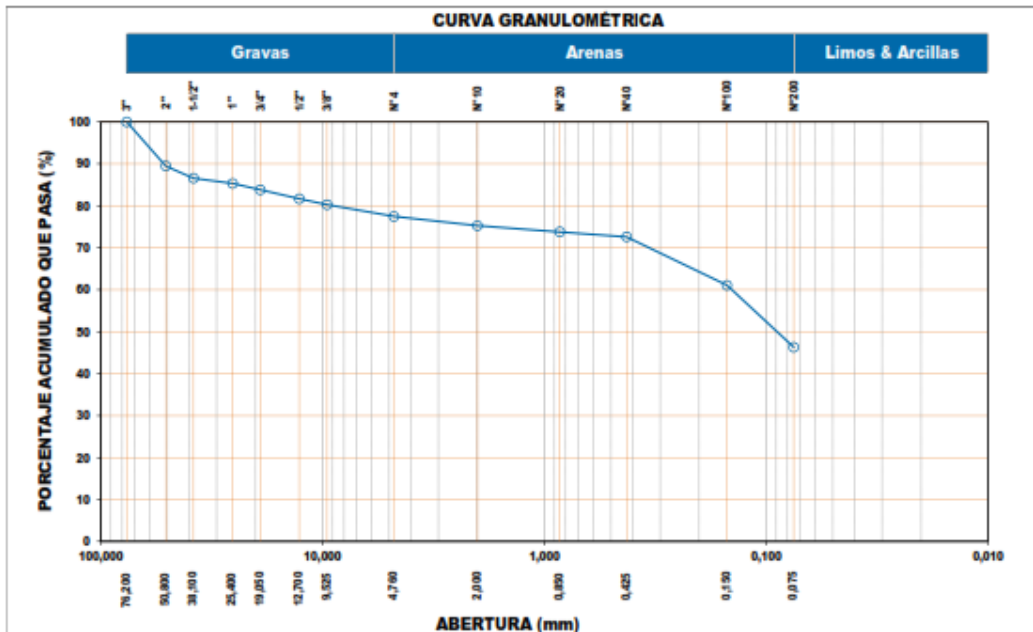
D <sub>10</sub>	
D <sub>30</sub>	
D <sub>60</sub>	0,14
Cu	
Cc	

<b>Límites de Atterberg:</b>	
LL (%)	18
LP (%)	14
IP (%)	4

Humedad (%)	6,7
-------------	-----

SUCS	SC-SM
------	-------

Arena arcillo-limosa con grava
--------------------------------

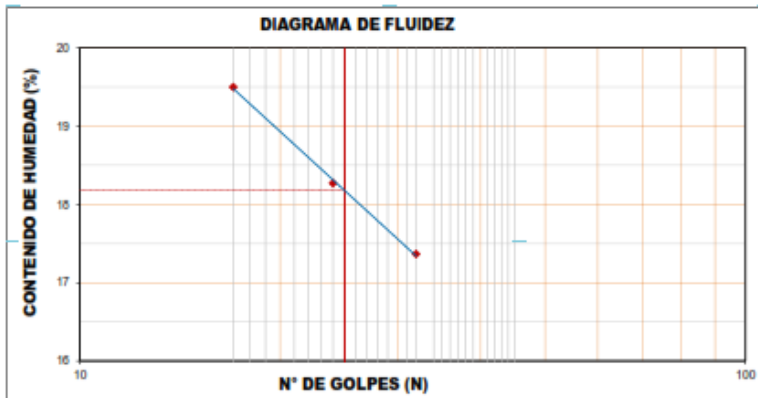


**Observación:**

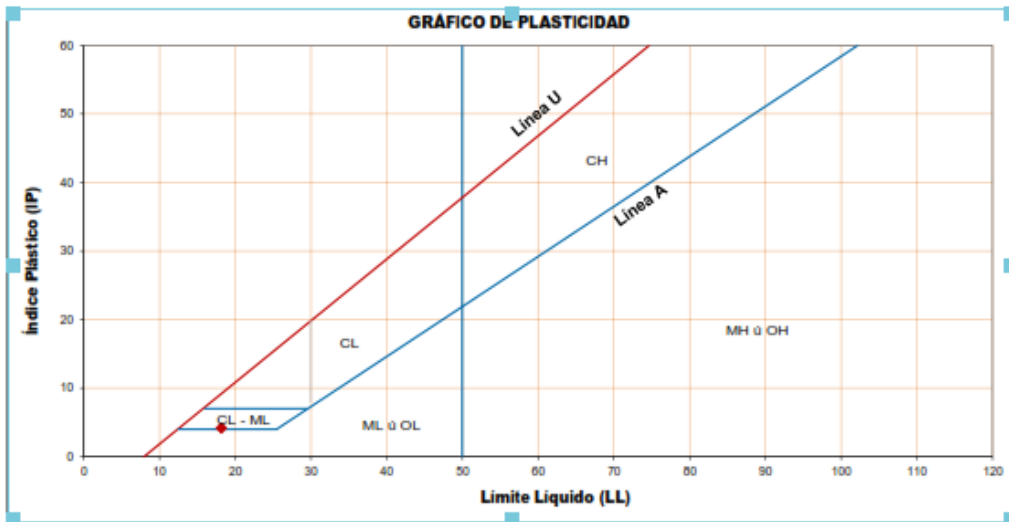
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

## LÍMITES DE ATTERBERG ASTM - D4318

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relieves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Victor Fajardo - Ayacucho		
Cód. de Muestra:	CI-1		Nº de Muestra: M-1
Profundidad (m):	0.30		Nº de Proyecto: ---
Zona:	D-2		



Límites de Atterberg	
LL (%)	18
LP (%)	14
IP (%)	4



**Observación:**  
Las muestras han sido proporcionadas e identificadas por el solicitante.

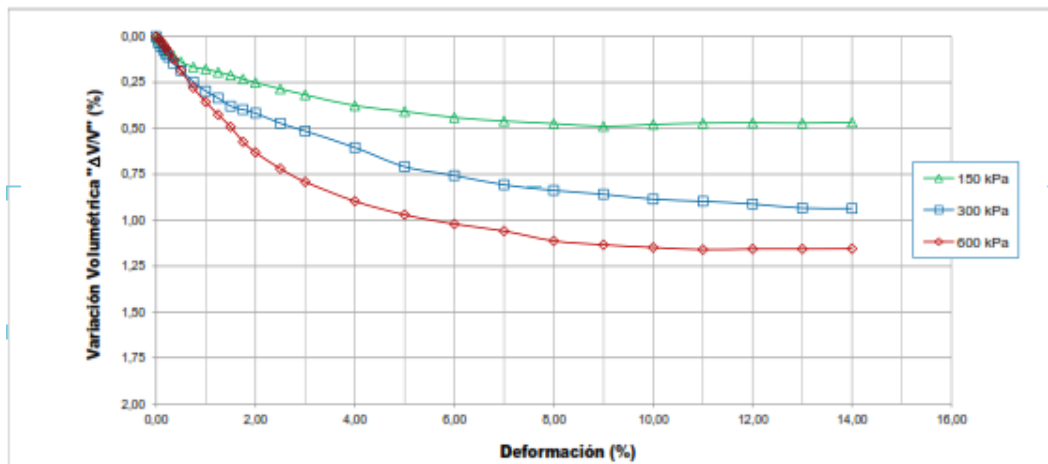
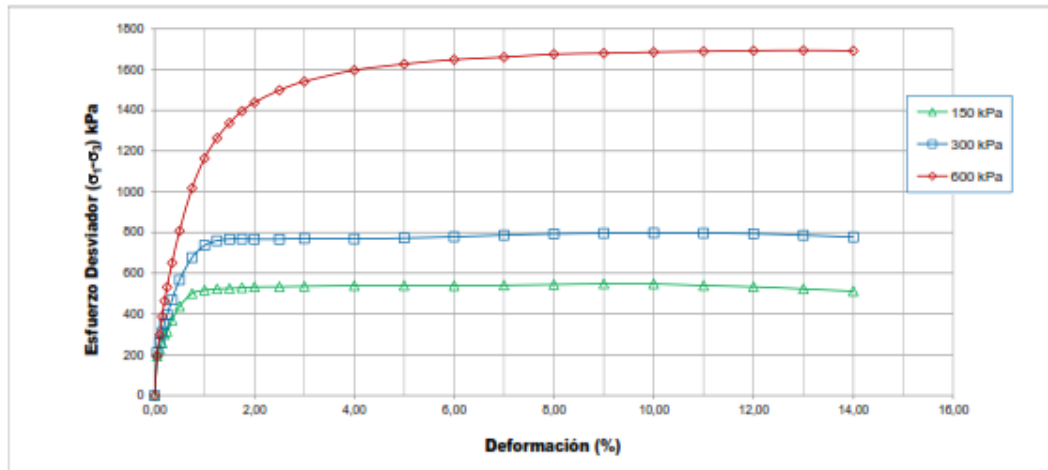
## ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

### Consolidado - Drenado (CD) ASTM - D4767'

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Victor Fajardo - Ayacucho		
Cód. de Muestra:	CI-1	Nº de Muestra:	M-1
Profundidad (m):	0.50	Nº de Proyecto:	---
Zona:	D-2		

**Clasificación SUCS:** SC-SM

**Estado : Inalterado**



## ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL

### Consolidado - Drenado (CD) ASTM - D4767\*

Nombre del Proyecto: **Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco**  
 Ubicación del Proyecto: **Canarias – Victor Fajardo - Ayacucho**  
 Cod. de Muestra: **CI-1** N° de Muestra: **M-1**  
 Profundidad (m): **0.50** N° de Proyecto: **---**  
 Zona: **D-2**

**Clasificación SUCS: SC-SM**

**Estado : Inalterado**

Etapa de consolidación	Inicio	Final
Altura (cm)	22,96	22,81
Diámetro (cm)	10,04	9,96
Humedad (%)	6,96	11,66
Densidad seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,162	2,203

Velocidad	0,125	(cm/min)
Parámetro "B"	0,90	
Presión de celda	753	kPa
Contra presión	153	kPa
Esf. Efect. Inicial	600	kPa

Deformación (%)	$\sigma_{desv}$ (kPa)	$p$ (kPa)	$q$ (kPa)	$p'$ (kPa)	$q'$ (kPa)	$q'/p'$	$(\sigma'_1/\sigma'_3)$
0,00	0	600,0	0,0	600,00	0,0	0,00	1,00
0,05	194	697,2	97,2	699,28	97,2	0,14	1,32
0,10	297	746,3	146,3	750,34	146,3	0,20	1,49
0,15	367	793,6	193,6	795,67	193,6	0,24	1,64
0,20	464	831,9	231,9	834,02	231,9	0,28	1,77
0,25	532	865,9	265,9	867,92	265,9	0,31	1,86
0,35	651	925,4	325,4	927,44	325,4	0,35	2,06
0,50	806	1004,1	404,1	1006,13	404,1	0,40	2,34
0,75	1016	1109,0	509,0	1110,36	509,0	0,46	2,69
1,00	1164	1182,1	582,1	1183,46	582,1	0,49	2,94
1,25	1264	1231,8	631,8	1232,46	631,8	0,51	3,10
1,50	1337	1266,7	666,7	1266,74	666,7	0,53	3,23
1,75	1396	1296,1	696,1	1297,36	696,1	0,54	3,33
2,00	1436	1319,2	719,2	1316,50	719,2	0,55	3,40
2,50	1499	1349,4	749,4	1346,70	749,4	0,56	3,50
3,00	1541	1370,7	770,7	1369,97	770,7	0,56	3,57
4,00	1597	1396,5	796,5	1397,60	796,5	0,57	3,66
5,00	1627	1413,6	813,6	1412,66	813,6	0,58	3,72
6,00	1649	1424,6	824,6	1423,22	824,6	0,58	3,75
7,00	1661	1430,5	830,5	1429,13	830,5	0,58	3,77
8,00	1676	1437,6	837,6	1437,16	837,6	0,58	3,80
9,00	1680	1440,2	840,2	1439,55	840,2	0,58	3,80
10,00	1686	1442,9	842,9	1442,25	842,9	0,58	3,81
11,00	1690	1444,8	844,8	1444,13	844,8	0,59	3,82
12,00	1693	1446,4	846,4	1445,75	846,4	0,59	3,82
13,00	1695	1447,3	847,3	1446,57	847,3	0,59	3,83
14,00	1692	1446,2	846,2	1445,52	846,2	0,59	3,82

## ENSAYO DE CONSOLIDACION

### ASTM - D2435

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Víctor Fajardo - Ayacucho		
Cod. de Muestra:	CI-1	Nº de Muestra:	M-1
Profundidad (m):	0.50	Nº de Proyecto:	---
Zona:	D-2		

#### DATOS DEL ESPÉCIMEN:

Altura inicial	2,01 cm	Clasif. SUCS	SC-SM
Diámetro	5,99 cm	Gravedad Específica	2,84
Altura de sólidos	1,45 cm	Peso de Sólidos (gr.)	115,90
Altura inicial de Vacíos	0,56 cm	Relación de Vacíos Inic.	0,388

#### ETAPA DE CARGA :

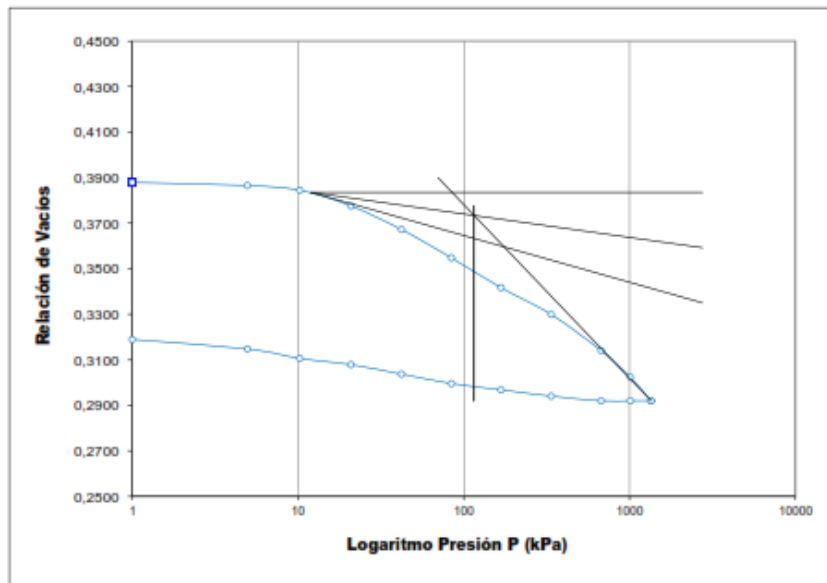
Carga Aplicada (kPa)	Lect. del Extens. (cm)	Asent. $\delta h$ (cm)	Altura de la muestra (cm)	Variación Relación Vacíos $\Delta e = \delta H / H_s$	Relación de vacíos $e_i$	Coef. de Consolid. " $C_v$ " (cm <sup>2</sup> /s)	Coef de Variación Volum. " $m_v$ " (kPa) <sup>-1</sup>
1	1,284		2,010		0,3880	---	---
5	1,282	0,00200	2,008	0,00138	0,3866	0,03426	0,00025
10	1,279	0,00500	2,005	0,00345	0,3845	0,03426	0,00028
21	1,269	0,01500	1,995	0,01036	0,3776	0,03426	0,00047
42	1,254	0,03000	1,980	0,02072	0,3672	0,03426	0,00035
84	1,236	0,04800	1,962	0,03315	0,3548	0,02379	0,00021
168	1,217	0,06700	1,943	0,04627	0,3417	0,01748	0,00011
336	1,200	0,08400	1,926	0,05800	0,3300	0,01338	0,00005
672	1,177	0,10700	1,903	0,07389	0,3141	0,00595	0,00003
1011	1,160	0,12400	1,886	0,08563	0,3023	0,00381	0,00002
1348	1,145	0,13900	1,871	0,09598	0,2920	0,00177	0,00002

#### ETAPA DE DESCARGA

Carga Aplicada (kPa)	Lect. del Extens. (cm)	Asent. $\delta h$ (cm)	Altura de la muestra (cm)	Variación Relación Vacíos $\Delta e = \delta H / H_s$	Relación de vacíos $e_i$	Carga Aplicada (kPa)	"k" (cm/s)
						1	---
1348	1,145	0,13900	1,871	0,09598	0,2920	42	1,181E-06
1011	1,145	0,13900	1,871	0,09598	0,2920	84	4,961E-07
336	1,148	0,13600	1,874	0,09391	0,2940	168	1,940E-07
168	1,152	0,13200	1,878	0,09115	0,2968	336	6,570E-08
84	1,156	0,12800	1,882	0,08839	0,2996	672	1,990E-08
42	1,162	0,12200	1,888	0,08424	0,3037	1011	9,300E-09
21	1,168	0,11600	1,894	0,08010	0,3079	Kprom = <b>1,570E-07</b>	
10	1,172	0,11200	1,898	0,07734	0,3106		
5	1,178	0,10600	1,904	0,07320	0,3148		
1	1,184	0,10000	1,910	0,06905	0,3189		

## ENSAYO DE CONSOLIDACION ASTM - D2435

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Víctor Fajardo - Ayacucho		
Cód. de Muestra:	CI-1	Nº de Muestra:	M-1
Profundidad (m):	0,30	Nº de Proyecto:	---
Zona:	D-2		



### DATOS DEL ESPECIMEN

	Inicial	Final
Contenido de Humedad, %	9,5	13,3
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2,05	2,20
Relación de Vacíos	0,388	0,292

### RESULTADOS DEL ENSAYO

Presión de Preconsolidación, $P_c$	115 kPa
Índice de Compresión, $C_c$	7,63E-02
Índice de Expansión, $C_s$	9,86E-03

## CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA PARED FLEXIBLE ASTM D-5084

Nombre del Proyecto:	Estudio de Ingeniería de Detalle para la Optimización del Depósito de Relaves Ramahuayco		
Ubicación del Proyecto:	Canarias – Víctor Fajardo - Ayacucho		
Cód. de Muestra:	CI-1	Nº de Muestra:	M-1
Profundidad (m):	0.50	Nº de Proyecto:	---
Zona:	D-2		

Datos del Ensayo	
Estado de la muestra:	Muestra Inalterada
Clasificación SUCS:	SC-SM
Confinamiento efectivo:	300 kPa

Calculo del Parámetro B			
Presión de Poros (kPa)	Presión de Celda (kPa)	B	
172.5	196.7	0.95	
445.8	484.5		

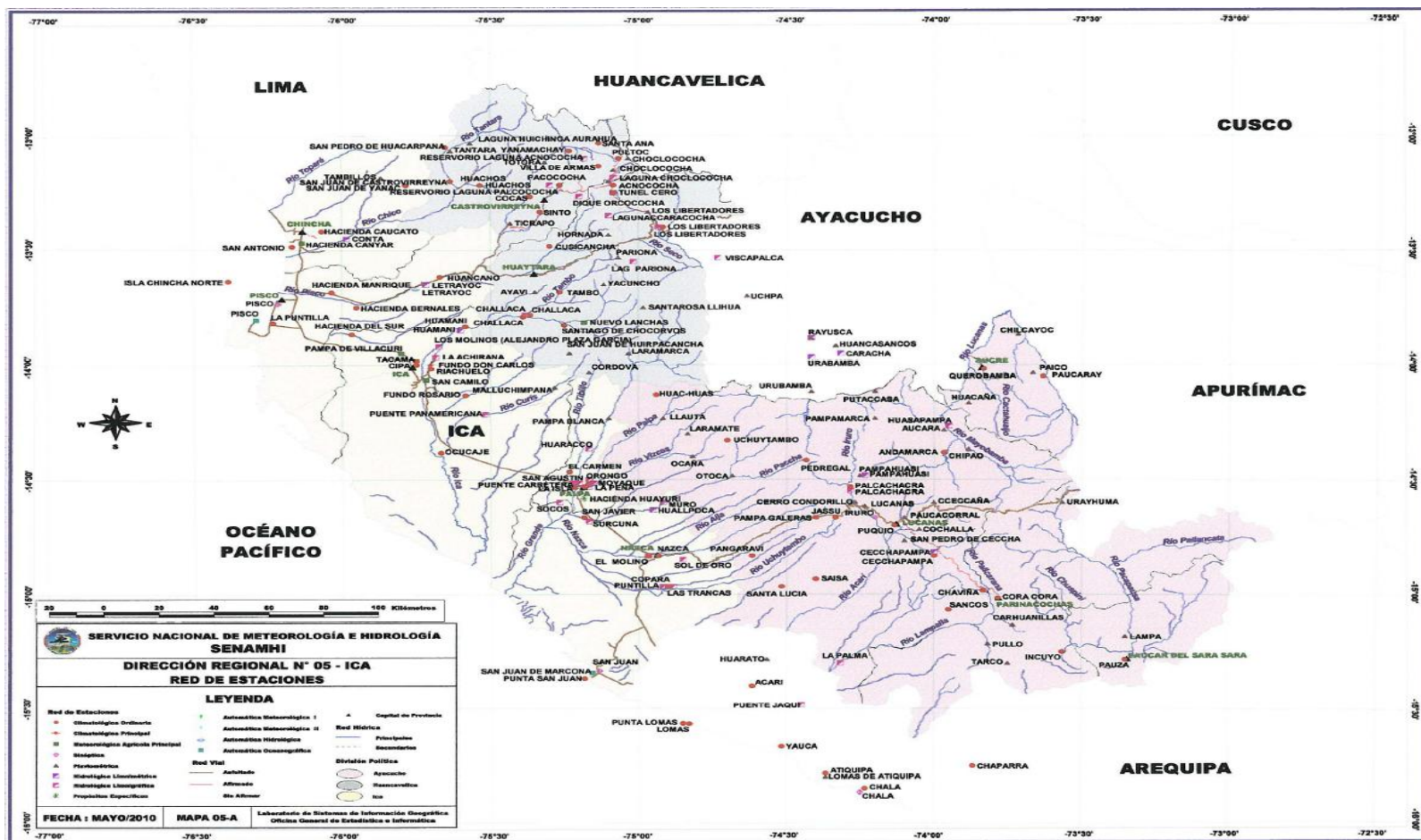
Diámetro Inicial (cm)	10.04	Diámetro Final (cm)	9.93
Altura Inicial (cm)	22.93	Altura Final (cm)	22.84
		Gravedad Especifica de Sólidos	2.88
Densidad inicial seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.14	Densidad final seca (gr/cm <sup>3</sup> )	2.19
Humedad Inicial (%)	7.6	Humedad final (%)	10.6
Saturación inicial (%)	63	Saturación final (%)	97

Medición del Coeficiente de Permeabilidad							
Nº	Gradiente (Δh/l)	Tiempo (s)	Vol ( V ) ( cm <sup>3</sup> )	Caudal ( Q ) ( cm <sup>3</sup> /s )	Perm. ( K <sub>r</sub> ) ( cm/s )	T (°C)	KT20°C ( cm/s )
1	24,91	13,0	0,20	1,5E-02	7,0E-06	27,0	6,6E-06
2	24,82	75,0	0,20	2,6E-03	1,3E-06	27,0	1,1E-06
3	24,74	90,0	0,20	2,2E-03	1,1E-06	27,0	9,6E-07
4	24,65	102,0	0,20	2,0E-03	1,0E-06	27,0	8,5E-07
5	24,56	108,0	0,20	1,9E-03	9,5E-07	27,0	8,1E-07
6	24,47	116,0	0,20	1,7E-03	8,9E-07	27,0	7,6E-07
7	24,39	101,0	0,20	2,0E-03	1,0E-06	27,0	8,7E-07
8	24,27	121,0	0,26	2,1E-03	1,1E-06	27,0	9,5E-07
9	24,15	129,0	0,26	2,2E-03	1,1E-06	27,0	9,7E-07
<b>Promedio</b>							<b>1,5E-06</b>

Resolución de la bureta de medición 0,02 cc

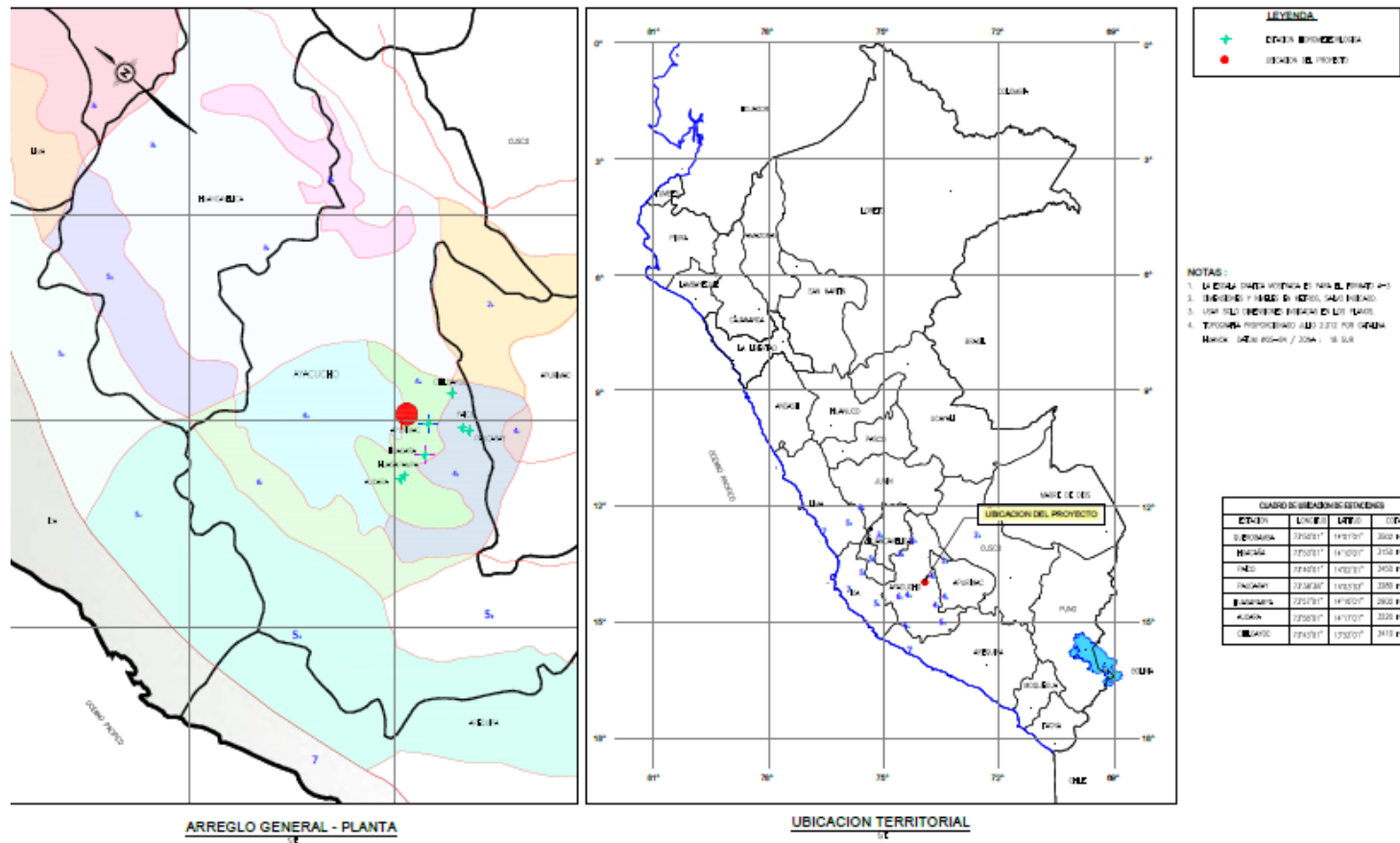
# Apéndice 6

## Plano de red de estaciones Senamhi



## Apéndice 7

### Mapa parcial de cuenca de la zona hidrológica - IILA



## Apéndice 8

### Calculo de precipitación máxima probable

#### CALCULO DE PRECIPITACION MAXIMA PROBABLE

Estación Querobamba

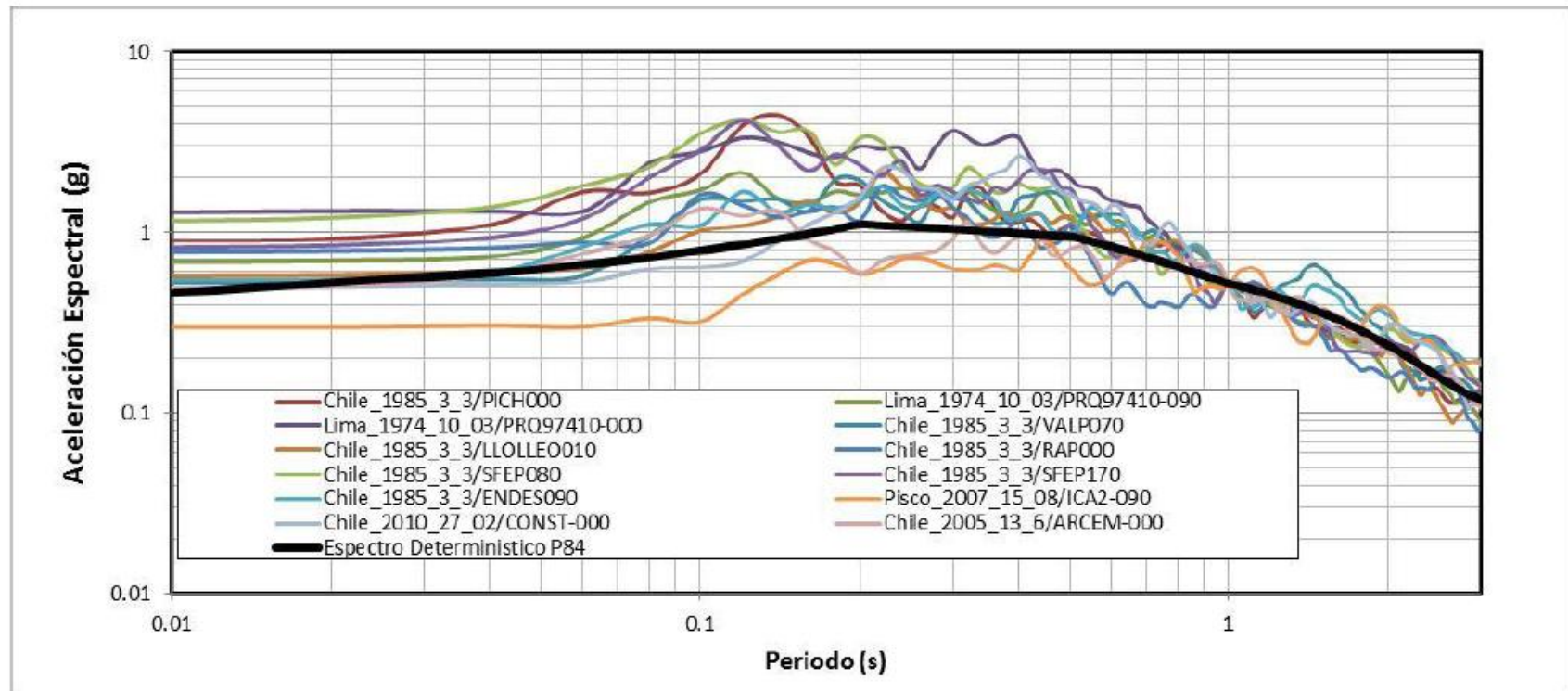
Año	Precipitación (mm)	
1979	43.4	
1975	37.5	
1967	35.2	
1968	35.2	
1971	34.6	
1969	33.6	
1972	30.0	
1974	28.2	
1977	28.0	
1980	28.0	
1965	26.5	
1970	26.2	
1966	25.3	
1973	22.5	
1978	20.9	
1976	17.8	
Promedio n =	29.56	(Xn)
D.estándar n =	6.68	(Sn)
Promedio n-1 =	28.63	(Xn-1)
D.estándar n-1 =	5.76	(Sn-1)
Xn-1/Xn =	0.97	
Sn-1/Sn =	0.86	

Factores de ajuste :

Parámetro	Por máxima lluvia observada	Por extensión del registro
Para Xn	1.02	1.11
Para Sn	1.08	1.03
Xn ajustado =	33.5	
Sn ajustado =	7.4	
Coefficiente K =	15.8	
PMP =	150.8	

## Apéndice 9

Comparación entre el Espectro Determinístico (SMC) y los espectros de eventos candidatos seleccionados



## Apéndice 10

*Ajuste Espectral entre el Espectro de Respuesta Determinístico (SMC) y el Espectro del Registro Pisco\_2007\_15\_08/ICA2-090*

