

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALURGICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**



**TESIS**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE RELAVES BEDREGAL  
PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN CONSORCIO MACHUPICCHU  
GOLD, CHUMBIVILCAS – CUSCO**

**PRESENTADO POR:**

Br. HAROLD SMITH VALDERRAMA PAREDES

**PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO DE MINAS**

**ASESOR:**

Mg. RAIMUNDO MOLINA DELGADO

**CUSCO – PERÚ**

**2025**



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

## VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN

### INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe asesor del trabajo de investigación / tesis titulada:  
**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE RELAVES  
BEDREGAL PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN CONSORCIO  
MACHUPICCHU GOLD, CHUMBIVILCAS – CUSCO”**

Presentado por **HAROLD SMITH VALDERRAMA PAREDES**, con DNI **75759044**  
y código universitario Nro. **143800** para optar al Título Profesional de:  
**INGENIERO DE MINAS**. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido  
a revisión por 02 (Dos) veces, mediante el software antiplagio Turnitin, conforme  
al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene  
un porcentaje de: **10 % (diez por ciento)**.

**Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de  
investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de  
enseñanza y otros (Art. 7, inc. 2 y 3)**

| Porcentaje     | Evaluación y acciones.                                                                                                                                                                                                                                                        | Marque con una X |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Del 1 al 10 %  | No se considera plagio.                                                                                                                                                                                                                                                       | X                |
| Del 11 al 30%  | Devolver al usuario para las correcciones.                                                                                                                                                                                                                                    | -----            |
| Mayores a 31 % | El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley. | -----            |

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 28 de abril de 2025.

FIRMA

POST FIRMA: Ing. Raimundo Molina Delgado  
DNI Nro.: 23912083

ORCID ID: 0000-0003-0291-2700

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:453639220?locale=es>

# HAROLD SMITH VALDERRAMA PAREDE

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE RELAVES BEDREGAL PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN CONSORCIO ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:453639220

Fecha de entrega

28 abr 2025, 3:07 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

28 abr 2025, 3:20 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE RELAVES BEDREGAL PARA EL CONTROL AMBIENTAL ....docx

Tamaño de archivo

15.1 MB

108 Páginas

16.777 Palabras

91.753 Caracteres

# 10% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 20 words)
- Submitted works

## Exclusions

- 29 Excluded Sources
- 3 Excluded Matches

## Top Sources

- 10%  Internet sources
- 1%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Integrity Flags

### 1 Integrity Flag for Review

-  **Hidden Text**  
21 suspect characters on 1 page  
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## **DEDICATORIA**

Con inmensa gratitud, dedico este trabajo a todas aquellas personas que han sido pilares fundamentales en mi vida y en este recorrido académico.

A mi madre y hermana, cuya dedicación y esfuerzo inquebrantables han sido el cimiento de mi formación. Su incondicional trabajo, sacrificio y ejemplo han sido faros que me han guiado hacia la consecución de este logro. Gracias por inculcarme los valores fundamentales del hogar, que me han acompañado no solo en este proyecto, sino también en cada aspecto de mi vida.

A mis docentes universitarios, quienes con su conocimiento y dedicación moldearon mi visión profesional y me equiparon con las herramientas necesarias para enfrentar los retos que se presentan en el ámbito de la ingeniería.

A mis familiares, amigos, colegas ingenieros, que con su apoyo y palabras de aliento han estado presentes en cada etapa de este desafío, compartiendo tanto mis dificultades como mis logros; dedico este logro como un testimonio de gratitud y compromiso con el propósito de aplicar lo aprendido en beneficio de nuestra sociedad.

.

Gracias a todos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi más sincera gratitud a todas las personas y entidades que contribuyeron de manera significativa a la culminación de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de fortaleza y guía, por permitirme superar los desafíos y culminar esta etapa tan importante en mi vida profesional. A mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y fe en mis capacidades, especialmente en los momentos más difíciles de este camino.

Al asesor de esta tesis, el Ing. Raimundo Molina Delgado, por su invaluable guía, paciencia y conocimiento compartido, que fueron esenciales para el desarrollo de este proyecto. A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a los docentes de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, y en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para mi crecimiento profesional.

Al Consorcio Machupicchu Gold, por facilitar el acceso a información técnica y permitir la realización de este estudio en sus instalaciones, contribuyendo significativamente a la aplicación práctica de los conceptos desarrollados.

Finalmente, a todos mis amigos y compañeros de estudios, por su apoyo, colaboración y las experiencias compartidas que enriquecieron este proceso.

Este logro es el resultado de los esfuerzos conjuntos y de las lecciones aprendidas de cada uno de ustedes.

Con gratitud,

**Harold Smith Valderrama Paredes**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal para asegurar un control ambiental efectivo en el Consorcio Machupicchu Gold, ubicado en Chumbivilcas, Cusco. La presa está diseñada con componentes clave como el dique de contención, construido con tierra de préstamo, un sistema de conducción de relaves, un sistema de drenaje superficial con un canal de coronación, impermeabilización del vaso con geomembrana HDPE y un sistema de drenaje de infiltración para evacuar el agua de relaves.

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y un nivel descriptivo, orientado al análisis de datos numéricos obtenidos mediante mediciones y cálculos. Este enfoque permitió evaluar de forma precisa las condiciones geotécnicas, estructurales y ambientales, fundamentales para el diseño de la presa. La justificación de este estudio se sustenta en la necesidad de mitigar riesgos ambientales debido al aumento en la producción minera de pequeños operadores en la región, promoviendo el cumplimiento normativo y la sostenibilidad de las actividades mineras.

El análisis de la estabilidad física del dique demostró que los factores de seguridad en condición estática fuera de servicio fueron de 1.987 (externo) y 1.804 (interno), mientras que en condición pseudoestática fueron de 1.210 (externo) y 1.108 (interno). En servicio, los factores de seguridad alcanzaron valores superiores, con 2.860 en estático y 1.435 en pseudoestático. Todos estos resultados superan los parámetros mínimos requeridos de 1.50 en estático y 1.00 en pseudoestático, garantizando la estabilidad del dique. Para el recubrimiento impermeable del vaso se utilizaron 34,859 m<sup>2</sup> de geomembrana HDPE, incluyendo traslapes y un factor de seguridad de 1.50. La inversión total para la construcción de la presa ascendió a S/ 1,590,702.11, asegurando un control ambiental efectivo y minimizando el riesgo de contaminación en la operación minera.

Palabras clave: Presa de relaves, dique, geomembrana, análisis de estabilidad

## ABSTRACT

This research aims to analyze the design and construction of the Bedregal tailings dam to ensure effective environmental control at Consorcio Machupicchu Gold, located in Chumbivilcas, Cusco. The dam is designed with key components such as the containment embankment constructed with borrow soil, a tailings transportation system, a surface drainage system with a crest channel, an HDPE geomembrane lining for the basin, and an infiltration drainage system to evacuate tailings water.

The study employs a quantitative approach with a non-experimental design and descriptive level, focusing on the analysis of numerical data obtained through measurements and calculations. This methodology enabled an accurate evaluation of the geotechnical, structural, and environmental conditions critical to the dam's design. The justification for this research lies in the need to mitigate environmental risks due to the increased mineral production from small-scale mining operations in the region, promoting regulatory compliance and the sustainability of mining activities.

The physical stability analysis of the embankment showed that the safety factors in static conditions when out of service were 1.987 (external) and 1.804 (internal), while in pseudo-static conditions, they were 1.210 (external) and 1.108 (internal). When in service, the safety factors improved to 2.860 in static conditions and 1.435 in pseudo-static conditions. All these results exceed the minimum required parameters of 1.50 in static and 1.00 in pseudo-static conditions, ensuring the embankment's stability. For the basin's impermeable lining, 34,859 m<sup>2</sup> of HDPE geomembrane were used, including overlaps and a safety factor of 1.50. The total investment for constructing the dam amounted to S/ 1,590,702.11, ensuring effective environmental control and minimizing contamination risks in mining operations.

**Keywords:** Tailings dam, embankment, geomembrane, stability analysis, environmental control.

## INDICE DE CONTENIDO

|                                                      |      |
|------------------------------------------------------|------|
| DEDICATORIA .....                                    | ii   |
| AGRADECIMIENTOS .....                                | iii  |
| RESUMEN.....                                         | iv   |
| ABSTRACT .....                                       | v    |
| INDICE DE CONTENIDO.....                             | vi   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                               | xii  |
| ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....                           | xiv  |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                               | xv   |
| ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....                          | xvi  |
| INTRODUCCIÓN .....                                   | xvii |
| CAPITULO I.....                                      | 18   |
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN ..... | 18   |
| 1.1. Planteamiento del problema.....                 | 18   |
| 1.2. Formulación del problema .....                  | 20   |
| 1.2.1. Problema general .....                        | 20   |
| 1.2.2. Problemas específicos.....                    | 20   |
| 1.3. Objetivos de la investigación .....             | 20   |
| 1.3.1. Objetivo general .....                        | 20   |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                   | 20   |
| 1.4. Justificación de la investigación.....          | 20   |
| 1.5. Hipótesis de la investigación.....              | 21   |
| 1.5.1. Hipótesis general .....                       | 21   |
| 1.5.2. Hipótesis específicas.....                    | 21   |
| 1.6. Variables e indicadores.....                    | 22   |
| 1.6.1. Variable Dependiente.....                     | 22   |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1.6.2. Variable independiente .....                        | 22 |
| 1.6.3. Operacionalización de variables.....                | 22 |
| 1.7. Metodología de la investigación .....                 | 22 |
| 1.7.1. Diseño y enfoque de la investigación .....          | 22 |
| 1.7.2. Nivel y tipo de investigación.....                  | 23 |
| 1.7.3. Población y muestra.....                            | 23 |
| 1.7.3.1. Población .....                                   | 23 |
| 1.7.3.2. Muestra.....                                      | 23 |
| 1.8. Delimitación de la investigación .....                | 23 |
| 1.8.1. Delimitación Temporal .....                         | 24 |
| 1.8.2. Delimitación Espacial .....                         | 24 |
| 1.9. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....  | 24 |
| 1.9.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos ..... | 24 |
| 1.9.1.1. Técnicas de procesamiento de información.....     | 24 |
| 1.9.1.2. Técnicas de análisis de datos .....               | 24 |
| 1.10. Limitaciones de la investigación .....               | 25 |
| CAPITULO II:.....                                          | 26 |
| II. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACIÓN .....                | 26 |
| 2.1. Antecedentes de la investigación .....                | 26 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales .....                  | 26 |
| 2.1.2. Antecedentes Nacional.....                          | 27 |
| 2.1.3. Antecedente local.....                              | 28 |
| 2.2. Bases teóricas .....                                  | 28 |
| 2.2.1. Geotecnia.....                                      | 28 |
| 2.2.1.1. Taludes. ....                                     | 28 |
| 2.2.1.2. Estructuras en tierra .....                       | 29 |
| 2.2.1.3. Estabilidad de estructuras .....                  | 29 |

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.1.4. Drenajes.....                                            | 29 |
| 2.2.1.5. Subdrenajes.....                                         | 29 |
| 2.2.2. Hidrogeología.....                                         | 30 |
| 2.2.2.1. Parámetros hidrogeológicos .....                         | 30 |
| 2.2.3. Presa de relaves .....                                     | 32 |
| 2.2.4. Tipos de presas .....                                      | 33 |
| 2.2.4.1. Estudios básicos para la elección del tipo de presa..... | 33 |
| 2.2.5. Presas de tierra.....                                      | 35 |
| 2.2.5.1. Presas homogéneas .....                                  | 35 |
| 2.2.5.2. Presas heterogéneas o de zona.....                       | 36 |
| 2.2.5.3. Características geométricas de una presa de tierra ..... | 36 |
| 2.2.6. Partes de la presa de relaves.....                         | 40 |
| 2.2.6.1. Presa o dique:.....                                      | 40 |
| 2.2.6.2. Desecho de lodos .....                                   | 40 |
| 2.2.6.3. Desecho de sólidos.....                                  | 40 |
| 2.2.6.4. Agua de relave .....                                     | 41 |
| 2.2.7. Estabilidad de taludes de presas .....                     | 41 |
| 2.2.7.1. Análisis de estabilidad de taludes .....                 | 41 |
| 2.2.7.2. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo .....         | 41 |
| 2.2.7.3. Criterios de falla de Mohr-Coulomb.....                  | 42 |
| 2.2.7.4. Método de análisis de estabilidad de taludes.....        | 44 |
| 2.2.7.5. Coeficiente de seguridad de presas .....                 | 46 |
| 2.2.8. Programa SLIDE .....                                       | 46 |
| 2.2.8.1. Slide para el análisis de estabilidad de taludes. ....   | 47 |
| 2.2.8.2. Slide para el análisis de filtración. ....               | 47 |
| 2.3. Impacto ambiental sobre los relaves.....                     | 47 |
| CAPITULO III: .....                                               | 49 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| III. DISEÑO DE PRESA DE RELAVES .....                                          | 49 |
| 3.1. Topografía del terreno de la presa de relaves .....                       | 49 |
| 3.1.1. Planeamiento de topografía.....                                         | 49 |
| 3.1.2. Recursos utilizados .....                                               | 50 |
| 3.1.2.1. Personal .....                                                        | 50 |
| 3.1.2.2. Equipos.....                                                          | 50 |
| 3.1.3. Ubicación de la relavera.....                                           | 50 |
| 3.1.4. Levantamiento topográfico .....                                         | 51 |
| 3.2. Geología del terreno de la presa de relaves .....                         | 54 |
| 3.3. Estudio geotécnico del área donde se construirá la presa de relaves ..... | 56 |
| 3.3.1. Ensayos de densidad .....                                               | 56 |
| 3.3.2. Caracterización geotécnica de las propiedades físico – mecánicas.....   | 56 |
| 3.3.2.1. Suelo de cimentación. ....                                            | 56 |
| 3.3.2.2. Relleno del dique. ....                                               | 57 |
| 3.3.3. Determinación de capacidad portante del suelo .....                     | 57 |
| 3.4. Estudio Hidrogeológicos del área donde se construirá la presa.....        | 58 |
| 3.4.1.1. Parámetros hidrogeológicos .....                                      | 59 |
| 3.4.1.2. Porosidad del suelo .....                                             | 59 |
| 3.5. Diseño de ingeniería de la presa de relaves .....                         | 60 |
| 3.5.1. Componentes estructurales de la presa .....                             | 60 |
| 3.5.2. Criterios para el diseño de la presa de relaves.....                    | 61 |
| 3.5.2.1. Consideraciones para el diseño de la presa de relaves.....            | 61 |
| 3.5.2.2. Ubicación del área de la presa de relaves.....                        | 61 |
| 3.5.2.3. Topografía del área .....                                             | 61 |
| 3.5.2.4. Estabilidad frente al desbordamiento.....                             | 62 |
| 3.5.2.5. Estabilidad frente a flujo incontrolado.....                          | 63 |
| 3.5.2.6. Estabilidad contra deslizamientos.....                                | 63 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.2.7. Capacidad de almacenamiento de la presa de relaves.....                          | 64 |
| 3.5.2.8. Volumen total de almacenamiento en la presa de relaves.....                      | 64 |
| 3.5.3. Parámetros de diseño de la presa de relaves .....                                  | 65 |
| 3.5.3.1. Diseño hidráulico .....                                                          | 65 |
| 3.5.3.2. Diseño estructural .....                                                         | 67 |
| 3.6. Coeficiente sísmico .....                                                            | 68 |
| 3.7. Análisis de la estabilidad de la presa.....                                          | 70 |
| 3.7.1. Análisis de estabilidad del dique antes del servicio .....                         | 70 |
| 3.7.1.1. Ingreso de datos al software Slide2 V.6.....                                     | 72 |
| 3.7.1.2. Resultados de análisis estabilidad física del dique sin entrar en servicio ..... | 74 |
| 3.7.1.3. Resultados de análisis estabilidad física del dique al entrar en servicio .....  | 76 |
| 3.8. Análisis de filtración de aguas subterráneas .....                                   | 77 |
| 3.8.1. Análisis de filtración según presión.....                                          | 77 |
| CAPITULO IV: .....                                                                        | 80 |
| IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....                                              | 80 |
| 4.1. Proceso de construcción de la presa de relaves.....                                  | 80 |
| 4.1.1. Replanteo y trazo de área de construcción.....                                     | 80 |
| 4.1.2. Retiro de capa arable o topsoil .....                                              | 81 |
| 4.1.3. Habilitación del área del vaso del depósito.....                                   | 82 |
| 4.1.4. Detalles cuantitativos de conformación del vaso del depósito.....                  | 82 |
| 4.1.5. Construcción del dique de cierre de la presa.....                                  | 82 |
| 4.1.6. Recubrimiento de la presa de relaves .....                                         | 85 |
| 4.1.7. Diseño de sistemas auxiliares del depósito de relaves.....                         | 87 |
| 4.1.7.1. Drenaje .....                                                                    | 87 |
| 4.1.7.2. Bombeo .....                                                                     | 88 |
| 4.1.7.3. Canales de coronación.....                                                       | 88 |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.7.4. Seguridad.....                                  | 89  |
| 4.2. Costo de la construcción de la presa de relave..... | 89  |
| CONCLUSIONES .....                                       | 91  |
| RECOMENDACIONES .....                                    | 92  |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                       | 93  |
| ANEXOS.....                                              | 95  |
| ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO.....                          | 96  |
| ANEXO 2: PLANOS .....                                    | 103 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Ciclo hidrológico .....                                                                 | 30 |
| Figura 2: Dique de presa de relaves.....                                                          | 32 |
| Figura 3: Presa homogénea .....                                                                   | 35 |
| Figura 4: Presa de tierra heterogénea.....                                                        | 36 |
| Figura 5: Características geométricas de la presa de tierra heterogénea o de zona.....            | 37 |
| Figura 6: Partes de una presa de relaves .....                                                    | 40 |
| Figura 7: Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr- Coulomb. ....             | 43 |
| Figura 8: Círculo de Mohr y envolvente de falla.....                                              | 44 |
| Figura 9: Círculo de falla de un talud. ....                                                      | 44 |
| Figura 10: Distribución de fuerzas en dovelas .....                                               | 45 |
| Figura 11: Programa Slide v.6.0.....                                                              | 47 |
| Figura 12: Ubicación de la construcción de la presa de relaves.....                               | 50 |
| Figura 13: Levantamiento topográfico de proyección de presa de relaves .....                      | 52 |
| Figura 14: Levantamiento topográfico de proyección de presa de relaves a curvas de nivel<br>..... | 53 |
| Figura 15: Geología de la zona de la investigación .....                                          | 55 |
| Figura 16: Columna estratigráfica de la zona de estudio .....                                     | 55 |
| Figura 17: Topografía del área del estudio del diseño de la presa de relave.....                  | 62 |
| Figura 18: Perfil longitudinal de la Presa de relave.....                                         | 65 |
| Figura 19: Detalle de geomembrana en canal de coronación.....                                     | 66 |
| Figura 20: Dirección del drenaje .....                                                            | 67 |
| Figura 21: Detalle de drenaje de infiltraciones subterráneas .....                                | 67 |
| Figura 22: Determinación de coeficiente sísmico .....                                             | 69 |
| Figura 23: Corte de sección A-A' .....                                                            | 71 |
| Figura 24: Datos ingresados para el suelo de cimentación .....                                    | 72 |
| Figura 25: Datos ingresados para el relleno del dique.....                                        | 73 |
| Figura 26: Factor sísmico.....                                                                    | 73 |
| Figura 27: Análisis de factor de seguridad del talud externo del dique – Estático.....            | 74 |
| Figura 28: Análisis de factor de seguridad del talud externo del dique – Pseudoestático<br>.....  | 74 |
| Figura 29: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Estático .....           | 74 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Pseudoestático ..... | 75 |
| Figura 31: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Estático .....       | 76 |
| Figura 32: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Pseudoestático ..... | 76 |
| Figura 33: La condición de altura del nivel de agua de la presa que es 19 m .....             | 77 |
| Figura 34: La presión de las aguas subterránea – para el caso es cero .....                   | 77 |
| Figura 35: Análisis de filtración de la presa de relave .....                                 | 78 |
| Figura 36: Presión vs la distancia de la presa .....                                          | 79 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fotografía 1: Replanteo.....                                              | 80  |
| Fotografía 2: Retiro de Topsoil .....                                     | 81  |
| Fotografía 3: Retiro de Topsoil .....                                     | 81  |
| Fotografía 4: Construcción de Dique.....                                  | 83  |
| Fotografía 5: Cierre de Dique.....                                        | 83  |
| Fotografía 6: Dique culminado.....                                        | 84  |
| Fotografía 7: Proceso de tendido de la geomembrana .....                  | 86  |
| Fotografía 8: Tendido de geomembrana en los taludes. ....                 | 86  |
| Fotografía 9: Presa de relave culminada .....                             | 87  |
| Fotografía 10: Drenaje construido .....                                   | 88  |
| Fotografía 11: Extracción de material del vaso de la presa.....           | 96  |
| Fotografía 12: Extracción de material del vaso de la presa.....           | 96  |
| Fotografía 13: Extracción de material del fondo del vaso de la presa..... | 97  |
| Fotografía 14: Extracción de material del fondo del vaso de la presa..... | 97  |
| Fotografía 15: Conformación de los taludes de la presa .....              | 98  |
| Fotografía 16: Conformación de los taludes de la presa .....              | 98  |
| Fotografía 17: Construcción del drenaje de la presa.....                  | 99  |
| Fotografía 18: Construcción del drenaje de la presa.....                  | 99  |
| Fotografía 19: Revestido de la base de la presa con Geomembrana .....     | 100 |
| Fotografía 20: Revestido de la base de la presa con Geomembrana .....     | 100 |
| Fotografía 21: Revestido de la base de la presa con Geomembrana .....     | 101 |
| Fotografía 22: Revestido de talud de la presa con Geomembrana .....       | 101 |
| Fotografía 23: Revestido de talud de la presa con Geomembrana .....       | 102 |
| Fotografía 24: Revestido de final de la presa con Geomembrana .....       | 102 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Operacionalización de variables .....                                                | 22 |
| Tabla 2: Valores del coeficiente de almacenamiento .....                                      | 31 |
| Tabla 3: Resguardo del borde libre de presas según U.S.B.R.....                               | 38 |
| Tabla 4: Taludes exteriores para presas de tierra.....                                        | 39 |
| Tabla 5: Taludes mínimos para terraplenes.....                                                | 39 |
| Tabla 6: Espesores y granulometría para el enrocamiento de presas (protección).....           | 39 |
| Tabla 7: Ensayos de densidad.....                                                             | 56 |
| Tabla 8: Caracterización de suelo de cimentación.....                                         | 57 |
| Tabla 9: Caracterización de relleno de dique .....                                            | 57 |
| Tabla 10: Datos del estudio de suelos.....                                                    | 57 |
| Tabla 11: Factores dependientes del ángulo de fricción .....                                  | 58 |
| Tabla 12: Paramentos hidrogeológicas .....                                                    | 59 |
| Tabla 13: Volumen total de almacenamiento de la presa de relave .....                         | 64 |
| Tabla 14: Factores de seguridad mínimos.....                                                  | 70 |
| Tabla 15: Parámetros de Resistencia al corte .....                                            | 71 |
| Tabla 16: Resultado de factor de seguridad estático – pseudoestático .....                    | 75 |
| Tabla 17: Resultado de factor de seguridad estático – pseudoestático puesta en servicio ..... | 76 |
| Tabla 18: Datos obtenidos del análisis de filtración .....                                    | 78 |
| Tabla 19: Calculo de volumen de material a extraer .....                                      | 82 |
| Tabla 20: Calculo de volumen requerido para el dique .....                                    | 82 |
| Tabla 21: Características del dique de contención .....                                       | 84 |
| Tabla 22: Datos de presa de relaves.....                                                      | 85 |

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

|             |                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------|
| <b>HDPE</b> | High Density Polyethylene - Polietileno de Alta Densidad |
| <b>TMD</b>  | Toneladas métricas diarias                               |
| <b>NAME</b> | Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias                   |
| <b>USBR</b> | US Bureau of Reclamation                                 |
| <b>FS</b>   | Factor de Seguridad                                      |
| <b>UTM</b>  | Universal Transverse Mercator                            |
| <b>msnm</b> | Metros sobre el nivel del mar                            |
| <b>KN</b>   | kilo newton                                              |
| <b>KPa</b>  | kilopascal                                               |
| <b>BM</b>   | Bench mark                                               |
| <b>IGV</b>  | Impuesto General a las Ventas                            |

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como propósito analizar el diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal, ubicada en el Consorcio Machupicchu Gold, provincia de Chumbivilcas, Cusco. La importancia de este estudio radica en asegurar un control ambiental efectivo que minimice los riesgos de contaminación generados por los desechos mineros. Las presas de relaves son infraestructuras críticas para el manejo adecuado de los residuos derivados del procesamiento de minerales, cuyo mal manejo podría ocasionar graves impactos en los suelos.

En primer capítulo, se ha formulado e identificado los problemas, objetivos, las hipótesis, para luego plantear las variables intervinientes en el proceso de la investigación, desarrollando la ingeniería apropiada utilizando los indicadores necesarios.

En segundo capítulo, se han definido las bases teóricas con las que se desarrollaron el proceso de investigación, definiendo claramente las variables que intervienen en el estudio.

En tercer capítulo, se realiza la evaluación del diseño de la presa de relave Bedregal, diseñada con componentes clave como el dique de contención, construido con tierra de préstamo, un sistema de conducción de relaves, un sistema de drenaje superficial con un canal de coronación, impermeabilización del vaso con geomembrana HDPE, y un sistema de drenaje de infiltración para evacuar el agua de relaves.

En cuarto capítulo, se desarrolló el proceso de construcción de la presa de relaves, así como el costo total de la inversión estimado.

Finalmente, se arribó con las conclusiones y recomendaciones en concordancia con los objetivos planteados en la investigación.

## **CAPITULO I**

### **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1. Planteamiento del problema**

La minería en el Perú, es una actividad económica clave que aporta significativamente al desarrollo del país. Sin embargo, esta actividad genera alrededor de millones de toneladas de relaves mineros anuales, que contienen desechos tóxicos y aguas ácidas, los cuales deben ser gestionados de manera segura para evitar graves impactos ambientales. Si estos relaves no son adecuadamente tratados y depositados en una relavera, el problema ambiental que genera es grave; los metales pesados y contaminantes pueden filtrarse al suelo y los cuerpos de agua, afectando la calidad del agua, la fertilidad de la tierra y poniendo en riesgo la biodiversidad y la salud de las comunidades cercanas. Las presas de relaves son infraestructuras críticas para el manejo de estos residuos, ya que su función principal es almacenar de forma controlada y segura los desechos generados por el procesamiento de minerales, minimizando los riesgos de contaminación de suelos, cuerpos de agua y ecosistemas locales.

En la provincia de Chumbivilcas, Cusco, la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal, operada por el Consorcio Machupicchu Gold, enfrenta la necesidad urgente de construir una presa de relaves para gestionar de manera segura los residuos generados por sus operaciones. Esta necesidad se ve acentuada por la creciente producción de mineral proveniente de pequeños productores mineros que operan en la provincia, quienes entregan su producción al Consorcio Machupicchu Gold para su procesamiento. Actualmente, la planta no dispone de una infraestructura adecuada para el depósito del creciente volumen de estos desechos, lo que incrementa significativamente el riesgo de contaminación ambiental en la zona. Ante este panorama, la empresa ha decidido implementar un proyecto para el diseño y construcción de una presa de relaves que permita manejar eficientemente el volumen creciente de residuos, garantizando al mismo tiempo un control ambiental riguroso que cumpla con las normativas vigentes en el Perú. Este proyecto no solo busca mitigar el impacto ambiental, sino también fortalecer la sostenibilidad de las operaciones mineras en la región.

El control ambiental es una de las principales motivaciones para esta investigación, ya que la construcción de la presa de relaves permitirá mitigar los impactos negativos generados por la planta concentradora, pueden contaminar los recursos hídricos y terrestres de la región. Al diseñar una presa de relaves bajo los estándares de seguridad y siguiendo las normativas ambientales peruanas, se garantizará la protección de los ecosistemas circundantes y la salud de las comunidades locales. El proyecto busca también fortalecer la reputación del Consorcio Machupicchu Gold como una empresa comprometida con la gestión ambiental responsable.

El proyecto incluye la construcción de una presa con un dique de cierre lineal de material de tierra de préstamo, con una altura de 21 metros y 130 metros de longitud por el lado norte. La base del vaso de la relavera tendrá una pendiente negativa de -1.5% hacia el talud del cerro al sur, adaptándose a las condiciones geográficas del terreno. Con una capacidad útil de 603.000 toneladas y una vida útil de 6,4 años a un ritmo de producción de 350 TMD, esta infraestructura se convierte en una solución técnica que busca integrar la gestión eficiente de residuos con un enfoque de sostenibilidad y control ambiental.

En este contexto, la presente investigación se centrará en el diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal, evaluando su impacto en el control ambiental en la región

de Chumbivilcas, Cusco. A través de un análisis detallado de los aspectos técnicos, ambientales y normativos, se espera desarrollar una infraestructura que asegure la sostenibilidad de las operaciones mineras mientras se protege el entorno natural y las comunidades afectadas por las actividades de la planta de tratamiento de minerales.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema general**

- ¿Cómo analizar el diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal para asegurar un control ambiental efectivo en el Consorcio Machupicchu Gold, ubicado en Chumbivilcas, Cusco?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- ¿Cuáles son las características geotécnicas del terreno destinado a la presa de relaves?
- ¿Cómo debe ser el diseño ingenieril de la presa de relaves?
- ¿Qué aspectos deben ser considerados en el análisis de la construcción de la presa de relaves?

## **1.3. Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Analizar el diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal para asegurar un control ambiental efectivo en el Consorcio Machupicchu Gold, ubicado en Chumbivilcas, Cusco.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar las características geotécnicas del terreno de la presa de relaves.
- Determinar el diseño ingenieril de la presa de relaves.
- Analizar la construcción de la presa de relaves.

## **1.4. Justificación de la investigación**

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de abordar la creciente demanda de una infraestructura eficiente para la gestión de relaves en la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal, ubicada en el distrito de Chamaca, provincia de Chumbivilcas,

Cusco, durante el año 2024. Esta necesidad surge ante el incremento en la producción minera por parte de pequeños mineros locales que entregan su mineral al Consorcio Machupicchu Gold. La inexistencia de una presa de relaves adecuada no solo limita la capacidad operativa de la planta, sino que también genera un impacto ambiental significativo, aumentando el riesgo de contaminación del suelo, los cuerpos de agua y los ecosistemas cercanos. Por esta razón, la investigación busca analizar el diseño y la construcción de una presa de relaves que garantice un manejo seguro de los residuos mineros, cumpla con las normativas nacionales y asegure la sostenibilidad ambiental en la región.

Desde una perspectiva técnica, este estudio se justifica por su contribución al diseño de una solución eficiente y sostenible para la gestión de relaves, considerando aspectos fundamentales como la estabilidad física del dique, el uso de geomembranas HDPE para la impermeabilización, y sistemas de drenaje para evitar infiltraciones y garantizar la seguridad estructural. Asimismo, la delimitación temporal y espacial del estudio permite generar resultados aplicables al contexto actual, proporcionando una guía técnica para la implementación de proyectos similares en otras áreas mineras. Al mismo tiempo, los resultados obtenidos tendrán un impacto positivo no solo en la sostenibilidad de las operaciones del consorcio, sino también en la mejora de las condiciones ambientales y sociales de la provincia de Chumbivilcas, fortaleciendo la relación entre la minería y el desarrollo local responsable de la zona.

## **1.5. Hipótesis de la investigación**

### **1.5.1. Hipótesis general**

- El diseño y la construcción de la presa de relaves Bedregal asegura un control ambiental efectivo en el Consorcio Machupicchu Gold, ubicado en Chumbivilcas, Cusco.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

- Las características geotécnicas del terreno de la presa de relaves se determinan con precisión, permitiendo una adecuada planificación y diseño.
- El diseño ingenieril de la presa de relaves cumple con los estándares técnicos y normativos necesarios para asegurar su estabilidad y funcionalidad.

- La construcción de la presa de relaves se analiza minuciosamente, identificando y resolviendo potenciales desafíos para garantizar su éxito y sostenibilidad.

## 1.6. Variables e indicadores

### 1.6.1. Variable Dependiente

- Control ambiental.

### 1.6.2. Variable independiente

- Diseño y construcción de la presa de relaves.

### 1.6.3. Operacionalización de variables

*Tabla 1: Operacionalización de variables*

| Variable      |                                              | Dimensión                                | Medida  |
|---------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|---------|
| INDEPENDIENTE | Diseño y construcción de la presa de relaves | Diseño de Presa de relaves               | diseño  |
|               |                                              | Geología del terreno de presa de relaves | Informe |
|               |                                              | Geotecnia de la presa de relaves         | Informe |
|               |                                              | Hidrogeología de la presa de relaves     | Informe |
| DEPENDIENTE   | Control ambiental                            | Producción de relaves                    | Tn      |
|               |                                              | Capacidad de planta de tratamiento       | Tn      |

Fuente: Propia

## 1.7. Metodología de la investigación

### 1.7.1. Diseño y enfoque de la investigación

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental, ya que se limita al análisis de datos y la observación de variables en su contexto natural, sin manipularlas. Este enfoque permite obtener una comprensión objetiva de los factores geotécnicos e ingenieros que intervienen en el diseño de una presa de relaves, fundamentando el análisis en datos numéricos obtenidos a través de mediciones,

observaciones y cálculos que respaldan la precisión y confiabilidad de los resultados. (Sampieri, R, 2016)

### **1.7.2. Nivel y tipo de investigación**

El nivel de esta investigación es descriptivo, orientado al análisis y descripción de las propiedades, características y comportamientos de los conceptos, fenómenos y variables relevantes al diseño y construcción de la presa de relaves en la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal. Este enfoque descriptivo permite una comprensión detallada de las condiciones geotécnicas del terreno, los requerimientos de ingeniería estructural y las normativas ambientales aplicables, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en el diseño. (Sampieri, R, 2016)

### **1.7.3. Población y muestra**

#### ***1.7.3.1. Población***

La población objetivo de esta investigación corresponde a los datos y características específicas de la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal, que presenta la necesidad de contar con una infraestructura adecuada de presa de relaves para la disposición segura y controlada de sus residuos mineros. (Sampieri, R, 2016)

#### ***1.7.3.2. Muestra***

La muestra en esta investigación está centrada en la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal, la que incluye características geotécnicas del terreno y parámetros de diseño estructural que son esenciales para evaluar la viabilidad y seguridad de la presa de relaciones propuesta. (Sampieri, R, 2016)

##### ***1.7.3.2.1. Tipo de muestra***

La muestra utilizada en esta investigación es no probabilística, seleccionada de acuerdo con el criterio del investigador. Los datos fueron recolectados considerando la pertinencia y relevancia de cada variable en función del diseño y análisis estructural de la presa de relaciones, permitiendo así un enfoque preciso en los factores críticos del proyecto.

### **1.8. Delimitación de la investigación**

### **1.8.1. Delimitación Temporal**

El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo durante el año 2024, abarcando las diferentes etapas del proyecto, desde la recopilación de información hasta el análisis de resultados.

### **1.8.2. Delimitación Espacial**

La investigación se centró en la Planta de Tratamiento de Minerales Bedregal, ubicada en el distrito de Chamaca, provincia de Chumbivilcas, departamento de Cusco. Este espacio comprende tanto el área de la planta como las instalaciones proyectadas para la construcción de la presa de relaves.

## **1.9. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La recolección de datos se realizará de acuerdo a la naturaleza del estudio, según las posibilidades de acceso a esta data, teniendo en cuenta el tamaño de la población.

### **1.9.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

#### ***1.9.1.1. Técnicas de procesamiento de información.***

Una vez recolectados los datos, estos serán procesados mediante técnicas de análisis y evaluación específicas, adecuadas para investigar tanto la geotecnia del terreno donde se construirá la presa de relaciones como el diseño de ingeniería de la misma. El procesamiento de datos incluye análisis estadísticos, modelado y simulaciones estructurales para evaluar la estabilidad del terreno y la resistencia de la estructura propuesta. Estos procedimientos permitirán obtener resultados precisos y confiables, necesarios para evaluar la viabilidad y seguridad de la presa, proporcionando así una base sólida para el análisis y toma de decisiones en la fase de diseño final.

#### ***1.9.1.2. Técnicas de análisis de datos***

Para el análisis de datos, se emplearán técnicas gráficas y estadísticas que permitirán identificar tendencias y patrones en la información recolectada, los cuales pueden no ser evidentes a simple vista. En esta investigación, se utilizarán herramientas como hojas de cálculo en Excel para procesar y organizar los datos numéricos, facilitando el cálculo y la visualización de resultados a través de gráficos y tablas. Además, el diseño de la presa de relaves será desarrollado mediante software especializado como AutoCAD,

permitiendo una representación precisa de los planos estructurales y geotécnicos necesarios para la evaluación detallada del proyecto.

#### **1.10. Limitaciones de la investigación**

Dentro de las limitaciones de la investigación, una de las principales limitaciones enfrentadas durante el desarrollo de esta investigación fue la falta de acceso a información detallada sobre el estudio de suelos realizado previamente por la empresa. Dicha información, considerada confidencial por la empresa, no fue proporcionada, lo que restringió la capacidad del investigador para verificar o recalcular directamente algunos parámetros críticos relacionados con las características geotécnicas del terreno y su comportamiento.

Para superar esta limitación, se trabajó con los datos proporcionados por la empresa, asumiendo su veracidad y representatividad. A partir de esta información, se desarrollaron demostraciones matemáticas rigurosas para validar los resultados obtenidos y garantizar su coherencia con los principios de la geotécnica. Este enfoque permitió sustentar los análisis y conclusiones del estudio, a pesar de la falta de acceso directo a la información original, asegurando la solidez científica del trabajo realizado.

## **CAPITULO II:**

### **II. MARCO TEORICO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1. Antecedentes de la investigación**

##### **2.1.1. Antecedentes internacionales**

Según el autor **Granda Castro (2016)**; en su tesis titulada “Propuesta de diseño de ampliación de la relavera de la planta de beneficio La López en el cantón Camilo Ponce Enríquez”, cuyo objetivo principal es desarrollar un diseño de ampliación para la relavera de la planta de beneficio “La López”, utilizando arenas de relave previamente caracterizadas geotécnicamente, con el fin de garantizar un almacenamiento seguro de los relaves, tanto desde el punto de vista técnico como ambiental. Se concluye que fue posible diseñar la ampliación de la relavera mediante la caracterización geotécnica de las arenas de relave con presencia de azufre, asegurando la estabilidad del talud con factores de seguridad óptimos y garantizando un almacenamiento adecuado de los relaves. Los ensayos realizados demostraron que la arena con azufre es un material idóneo para la construcción de la ampliación, ya que sus propiedades aplicadas al diseño permitieron obtener factores de seguridad que cumplen con los requisitos técnicos de estabilidad..

### 2.1.2. Antecedentes Nacional

Según el autor **Yanac (2021)**, en su tesis titulada “Análisis del diseño y proceso constructivo de un enrocado utilizando desmontes para la construcción de una presa de relaves-mina La Bonita, Arequipa”, El objetivo principal es evaluar el diseño y el proceso constructivo de un enrocado utilizando desmontes para la construcción de una presa de relaves en la mina La Bonita, Arequipa. Se concluye que las fallas en presas de relaves a lo largo de la historia han estado principalmente relacionadas con deficiencias en su manejo y proceso constructivo, lo que resalta la importancia de realizar estudios previos adecuados. Entre estos estudios se incluyen los análisis de suelos en el área de asentamiento para la selección de equipos y materiales geosintéticos, ensayos de permeabilidad y estudios fisicoquímicos del desmonte a utilizar para identificar posibles rocas reactivas. Cuando los estudios previos confirman la viabilidad del proyecto, el diseño de la presa inicia con la estimación del volumen de material necesario, considerando la granulometría en la fundación (base de la presa), el núcleo central, y los taludes internos y externos. El proceso constructivo comienza con la preparación del área de fundación, donde se retira el material superficial suelto y meteorizado, realizando un corte escalonado para optimizar el asentamiento del dique de contención. Luego, se procede con la instalación del sistema de subdrenaje, siguiendo el modelo de un niño francés con pozas de acumulación. Posteriormente, se ejecutan ensayos de compactación para determinar el número óptimo de pasadas del material a emplear, que puede incluir suelo, grava, desmonte de mina, desmonte de voladura o una mezcla de estos. La construcción de la presa de relaves se inicia con la disposición de desmonte mixto en el núcleo, mientras que en el talud interno se emplea desmonte de mina junto con grava y suelos, compactando en capas de 0,5 m con humectación de 100-200 L/m<sup>3</sup>. Este procedimiento se repite hasta alcanzar la altura de diseño de 15 m. Finalmente, la estructura se sella mediante la conformación de la pared interna de la presa, aplicando un sistema de impermeabilización que incluye geotextil, GSL y geomembrana.

Según el autor **Apaza (2019)**, en su tesis titulada “Diseño de recrecimiento de la presa de relaves de la unidad de producción UNTUCA-MINERA CORI PUNO SAC”; que tiene como objetivo principal el diseño de la capacidad de almacenamiento de la presa de relaves es asegurar la utilización de técnicas y procedimientos para almacenamiento en el área disponible de 550,000 metros cúbicos de relaves en pulpa, de acuerdo a las reservas económicas a tratar en la planta concentradora, de 350 TMD y aumentar la vida útil de la

presa. Concluyendo que el diseño de recrecimiento de presa de relaves es asegurar la utilización de técnicas y procedimientos para almacenamiento en el área disponible de 550,000 metros cúbicos de relaves en pulpa, de acuerdo a las reservas económicas a tratar en la planta concentradora, de 350 TMD y aumentar la vida útil de la presa. Asegurar la calidad de construcción de la presa de relaves para almacenar 550,000 metros cúbicos, para una planta de beneficio de 350 TMD. De acuerdo al balance metalúrgico.

### **2.1.3. Antecedente local**

Según el autor Pagaza Castillo & Montesinos Farfan (2009); en su tesis titulada “Estudio de Impacto Ambiental Semi Detallado para la Planta de Beneficio de Ampay” que tiene por objetivo realizar un plan de manejo ambiental y promover las medidas de prevención, control, mitigación, así como proponer implementación, operación y cierre del proyecto de la presa de relaves. Concluyendo que el agua no se contaminara ya que se utilizara el agua mínima ya que esta recirculara dentro de la planta de beneficio; así como se tendrá que implementar una nueva relavera en un periodo adecuado hasta que se llene la actual relavera.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Geotecnia**

Geotecnia es la aplicación de los métodos científicos y de los principios de ingeniería a la generación, interpretación y utilización del conocimiento de los materiales y procesos que ocurren en la corteza terrestre para la solución de problemas de ingeniería. Para su cabal desarrollo requiere la aplicación de diferentes campos del conocimiento, entre ellos, la mecánica de suelos, la mecánica de rocas, la geología, la geofísica, la hidrología, la hidrogeología y las ciencias relacionadas. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### **2.2.1.1. Taludes.**

La infraestructura, el urbanismo y las edificaciones en áreas pendientes requieren movimientos de tierra para adecuación de terrenos. Estas actividades dan como resultado taludes de corte y de relleno, pendientes y altos, donde es necesario optimizar el espacio útil, o requieren estructuras de contención. Los taludes y laderas naturales sufren

inestabilidad y ocasionan problemas graves con pérdidas económicas y de vidas. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### ***2.2.1.2. Estructuras en tierra***

Cuando se construyen estructuras en suelos granulares o plásticos para la adecuación de terrenos en un proyecto vial, una conducción de agua o una edificación, son necesarias estructura o terraplenes con materiales con las características geomecánicas de diseño. Para lograrlo es necesario realizar el control de la humedad, verificar el grado de compactación, la estabilidad volumétrica y la resistencia del suelo. Estos valores se verifican por medio de los ensayos de campo y laboratorio sobre especímenes tomados de la estructura y los análisis de estabilidad física y volumétrica. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### ***2.2.1.3. Estabilidad de estructuras***

Los problemas de la capacidad portante de suelos de una cimentación, los asentamientos, la interacción suelo estructura, los empujes que soporta una estructura y los esfuerzos por presiones de agua, son abordados por la geotecnia. Se incluye la estabilidad de estructuras afectadas por la socavación en ríos. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### ***2.2.1.4. Drenajes***

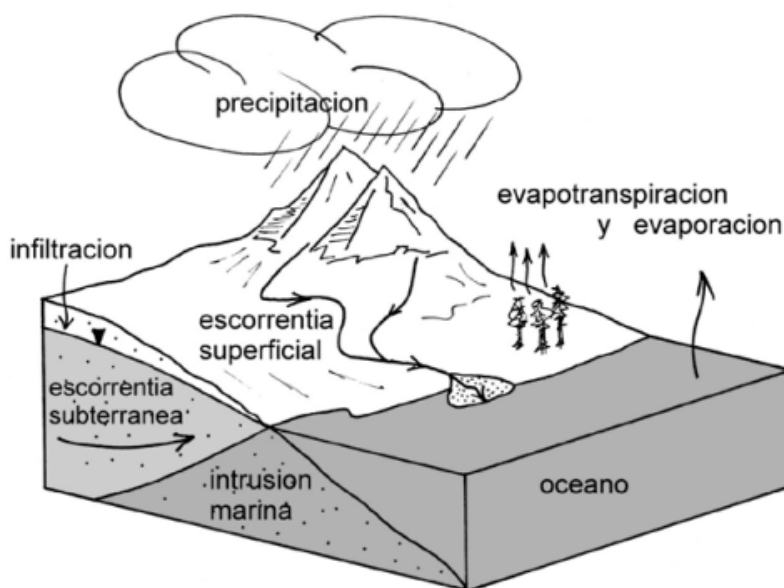
Las estructuras hidráulicas son el soporte de la estabilidad de estructuras como vías, áreas urbanas, tratamientos de taludes, y su omisión o las fallas que se pueden presentar en una estructura hidráulica son causas de problemas graves. De ahí que las soluciones de geotecnia incluyen la determinación de los caudales de las aguas de escorrentía, el dimensionado de las estructuras hidráulicas y de los descoles. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### ***2.2.1.5. Subdrenajes.***

Los elementos de subdrenaje contribuyen a la estabilidad de estructuras como vías, muros de contención, pantallas ancladas y taludes, todos conservan su estabilidad en el tiempo gracias a la acción de los elementos de subdrenaje, cuando controlan la fluctuación de los niveles freáticos y las presiones de poro. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

### 2.2.2. Hidrogeología

En la superficie de la Tierra el agua puede encontrarse en sus tres fases; vapor, líquida o sólida. El ciclo hidrológico explica como tiene lugar el constante movimiento del agua, tanto sobre la superficie del terreno como subterráneamente, y en sus diferentes estados. En la figura se representa una esquematización simplificada del ciclo hidrológico. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)



*Figura 1: Ciclo hidrológico*

Fuente: Hidrogeología 2019

#### 2.2.2.1. Parámetros hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos permiten conocer y cuantificar cómo es el movimiento del agua en el interior del acuífero, de acuerdo con la ecuación general del flujo de las aguas subterráneas. Seguidamente se definen los más útiles y empleados, que son: porosidad, permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, así como el concepto de caudal específico. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

##### 2.2.2.1.1. Porosidad

La porosidad de una roca, o porosidad total, viene expresada por la relación entre el volumen de intersticios en una muestra dada de un medio poroso y el volumen bruto del medio poroso incluidos los huecos. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### 2.2.2.1.2. Permeabilidad

La permeabilidad se define como el flujo unitario de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente hidráulico unitario, a temperatura de campo. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### 2.2.2.1.3. Transmisividad

Es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es un parámetro representativo de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Se suele medir en m<sup>2</sup>/día, siendo menos habitual en m<sup>2</sup>/hora o en m<sup>2</sup>/segundo. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

#### 2.2.2.1.4. Coeficiente de almacenamiento

En Custodio y Llamas (1983) se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad, y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de la carga hidráulica. Es un parámetro adimensional. En el glosario de la UNESCO (1992), el coeficiente de almacenamiento viene definido como el volumen de agua liberado o añadido a un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación de carga hidráulica.

*Tabla 2: Valores del coeficiente de almacenamiento*

| <b>Tipo de material permeable</b>                          | <b>Tipo acuífero</b> | <b>Valor medio de S</b>                 |
|------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| Cárstico:<br>Caliza y dolomías jurásicas                   | Libre                | $2 \times 10^{-2}$                      |
|                                                            | Semiconfinado        | $5 \times 10^{-4}$                      |
|                                                            | Confinado            | $5 \times 10^{-5}$                      |
| Cárstico:<br>Calizas y dolomías cretácicas<br>y terciarias | Libre                | $2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$   |
|                                                            | Semiconfinado        | $10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$            |
|                                                            | Confinado            | $10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$            |
| Poroso intergranular:<br>Gravas y arenas                   | Libre                | $5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$  |
|                                                            | Semiconfinado        | $10^{-3}$                               |
|                                                            | Confinado            | $10^{-4}$                               |
| Cársticos y porosos:<br>Calcarenitas marinas terciarias    | Libre                | $15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$ |

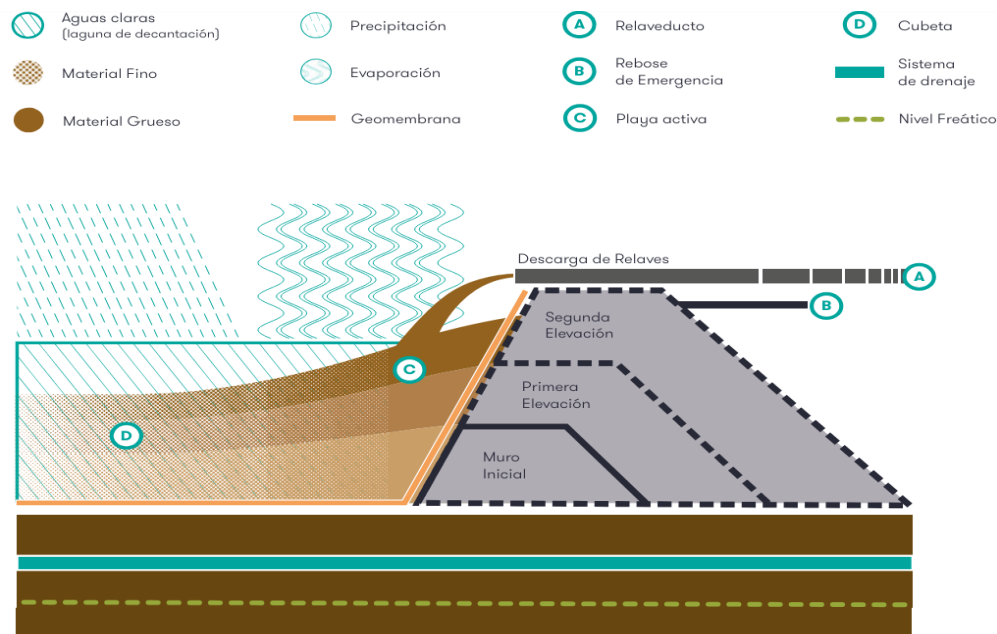
#### 2.2.2.1.5. *Caudal específico*

El caudal específico ( $Q_e$ ) de un pozo se define como el cociente entre el caudal de agua bombeada, expresada en litros por segundo, y el descenso del nivel piezométrico producido en el pozo expresado en metros.

#### 2.2.3. Presa de relaves

Las presas de relaves (colas) son obras de infraestructura para almacenar o represar los relaves (colas), construidas a partir de un muro inicial conformado por material de préstamo, estéril y/o material grueso del relave previamente separado en procesos de tratamiento físico (hidrociclonado y centrifugado). El muro inicial y el suelo de fundación de la presa deben estar impermeabilizados con el objetivo de evitar infiltraciones que influyan en la estabilidad física o contaminen las fuentes hídricas subterráneas. Estas estructuras cuentan por lo general con canales perimetrales, sistemas de drenajes subsuperficiales y tuberías de desagüe para minimizar la saturación de los relaves, con aguas del proceso, aguas superficiales, y aguas lluvias. El agua captada se conduce por lo general a sistemas de sedimentación y tratamiento, para realizar posteriormente procesos de recirculación, siendo reutilizada en la operación minera o es vertida según los parámetros estipulados por la normatividad vigente. (Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020)

*Figura 2: Dique de presa de relaves*



Fuente: Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda., 2020

#### **2.2.4. Tipos de presas**

Se clasifican por:

- Presa de tierra
- Presa de enrocado o escollera
- Presa de gravedad de hormigón
- Presa de arco de hormigón

##### ***2.2.4.1. Estudios básicos para la elección del tipo de presa***

La elección del tipo de presa requiere cooperación entre expertos en diversas disciplinas con el fin de asegurar diseños adecuados y económicamente viables con los condicionantes físicos, como la topografía, geología y condiciones del cimiento, materiales disponibles, hidrología. (Ramos Bosque, 2015)

- **Topografía**

Las consideraciones topográficas incluyen la configuración del terreno en el emplazamiento de la presa y del área del embalse, así como la accesibilidad al emplazamiento y a los materiales de construcción. La topografía determina, a groso modo, la primera elección del tipo de presa. Un cauce estrecho que discurre entre altos y rocosos muros sugeriría naturalmente una presa de escollera o de hormigón de aliviadero superior. Por otra parte, laderas bajas y onduladas sugerirían una presa de tierras. Condiciones intermedias podrían sugerir otras tipologías, como una estructura compuesta. El caso es que la topografía es de máxima importancia a la hora de elegir el tipo de presa. (Ramos Bosque, 2015)

- **Geología y condiciones de los cimientos**

La idoneidad de los diversos tipos de rocas y terrenos como cimiento y material de construcción constituyen problemas geológicos que deben ser tenidos en consideración. La condición geológica en un emplazamiento de presa a menudo determina el tipo de presa adecuado en dicho lugar. La resistencia, grosor, e inclinación de los estratos, permeabilidad, fracturación y disposición de las fallas resultan factores importantes en la elección del tipo de presa. A continuación, se comentan algunos de los cimientos más comunes. (Ramos Bosque, 2015)

#### **a. Cimentación en roca.-**

Los cimientos de roca compacta, que estén libres de defectos geológicos significativos, tengan una resistencia relativamente alta a cortante, sean resistentes a la erosión y a la percolación, ofrecen pocas restricciones al tipo de presa que se pueden construir sobre ellos. El factor determinante debería ser la economía de los materiales o el coste total.

Frecuentemente es necesario retirar la roca meteorizada así como sellar grietas y fracturas mediante inyectado. Rocas más débiles como esquistos de arcilla, algunas areniscas, basalto meteorizado, etc., pueden presentar problemas significativos al diseño y la construcción de una presa y pueden influenciar grandemente en el tipo de presa elegida. (Ramos Bosque, 2015)

#### **b. Cimientos de grava.-**

Los cimientos de grava, si están bien compactados, son adecuados para presas de tierra y escollera. Debido a que los cimientos de grava pueden dar lugar a grandes pérdidas de agua, deben tomarse precauciones especiales a fin de proporcionar un adecuado control de las filtraciones. (Ramos Bosque, 2015)

#### **c. Cimientos de limo o arena fina.-**

Los cimientos de limo o tierra fina pueden ser adecuados para pequeñas presas de gravedad de hormigón y presas de tierra si están bien proyectadas, pero no son buenos para presas de escollera. Los problemas principales pueden ser: el asentamiento diferencial, el potencial sifonamiento, el empuje vertical, la formación de conductos de filtración, las excesivas pérdidas de agua y la protección del cimiento en el pie de aguas abajo de la presa contra la posible erosión. (Ramos Bosque, 2015)

#### **d. Cimientos de arcilla.-**

Los cimientos de arcilla son adecuados para presas de tierra, pero requieren espaldones relativamente tendidos debido a la baja resistencia cortante del cimiento. Los cimientos de arcilla bajo el dique pueden sufrir asentamientos importantes. A causa de la necesidad de espaldones de baja pendiente y la tendencia de los suelos de arcilla a consolidar de forma acusada, habitualmente no es económico construir una presa de escollera sobre estos cimientos. Tampoco son normalmente adecuados para presas de gravedad de hormigón.

Habitualmente se requieren ensayos del material de cimiento en su estado natural para determinar las características de consolidación de los estratos del cimiento y su capacidad para soportar la sobrecarga añadida. (Ramos Bosque, 2015)

#### **e. Cimientos no uniformes.-**

Puede ocurrir que no se presente ninguno de los casos anteriores y se tenga que realizarse la cimentación en una zona heterogénea, formada por rocas y tierras. No obstante estas condiciones pueden ser compensadas por diseños especiales. Incluso los emplazamientos de presa que no resulten inusuales presentan problemas especiales que requieren la elección de un apropiado tratamiento por ingenieros experimentados. (Ramos Bosque, 2015)

- **Hidrología.**

Hay una estrecha relación entre los factores hidrológicos y económicos que influyen en la elección del tipo de presa y sus estructuras anexas. Las características del régimen hidráulico y la precipitación pueden afectar apreciablemente el coste de la construcción por su influencia en el tratamiento y desvío del río y prolongar el tiempo de construcción. En el caso de ser necesario un túnel de gran longitud para el desvío, la transformación de dicho túnel de desvío en aliviadero podría proporcionar la alternativa más económica. (Ramos Bosque, 2015)

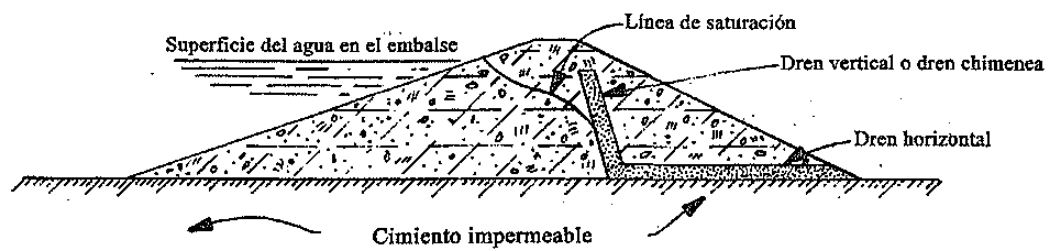
### **2.2.5. Presas de tierra**

#### **2.2.5.1. Presas homogéneas**

Una presa de tipo homogéneo puro se compone de material de una sola clase (excluyendo la protección de los taludes). El material que forma la presa debe ser suficientemente impermeable como para proporcionar una estanqueidad adecuada, los taludes por exigencias de la estabilidad deben ser relativamente tendidos.

La sección completamente homogénea ha sido sustituida por una sección modificada, en la cual pequeñas cantidades de material permeable cuidadosamente colocado controlan la acción de la filtración de forma que se permiten taludes más pronunciados, según indica la Figura siguiente. (Ramos Bosque, 2015)

*Figura 3: Presa homogénea*

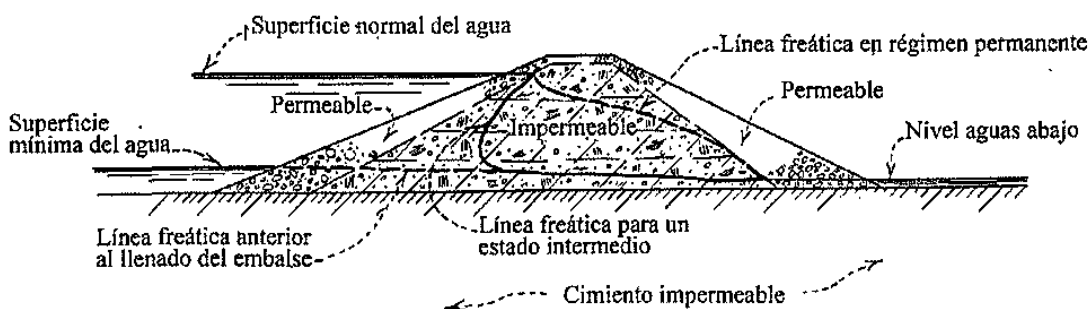


Fuente: US Bureau of Reclamation (2011).

#### 2.2.5.2. Presas heterogéneas o de zona

El tipo más común de sección de presa de tierra compactada es aquel que tiene un núcleo central impermeable, cubierto por zonas de materiales considerablemente más permeables, como se ilustra en la Figura abajo. Las zonas permeables cubren, soportan y protegen el núcleo impermeable. En muchos casos es necesario un filtro entre la zona impermeable y las permeables aguas abajo y una capa de drenaje debajo de la capa permeable aguas abajo. En algunos casos se construyen multicapas para cumplir las necesidades de capacidad. Puede decirse, que si se dispone de suelos diferentes la elección del tipo de presa será siempre del tipo heterogéneo (en zonas), puesto que sus inherentes ventajas producen una gran economía en el coste de construcción. (Ramos Bosque, 2015)

Figura 4: Presa de tierra heterogénea

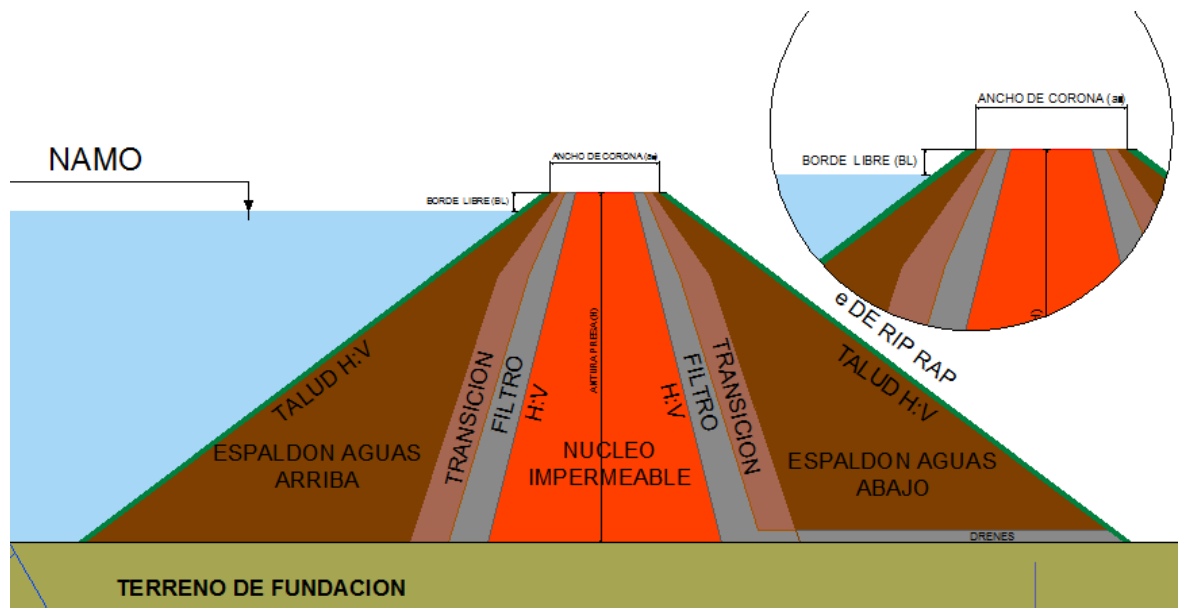


Fuente: US Bureau of Reclamation (2011).

#### 2.2.5.3. Características geométricas de una presa de tierra

La sección típica de una presa de tierra heterogénea o de zonas, se muestra en la Figura 3, donde se define los componentes y ciertas características geométricas de una presa: ancho de corona, altura de presa, borde libre, nivel de aguas, taludes exteriores, protección de taludes. (Ramos Bosque, 2015)

Figura 5: Características geométricas de la presa de tierra heterogénea o de zona



Fuente: adaptación de la US Bureau of Reclamation (2011).

#### 2.2.5.3.1. Borde libre :

Es la distancia vertical entre el nivel de la corona y el de agua máxima extraordinaria (N.A.M.E.). Según las recomendaciones de U.S.B.R. y el Código de Presas de Arizona. (Ramos Bosque, 2015)

i) Fórmula de Stevenson

$$h_o = 0.76 + 0.34F^{1/2} - 0.26F^{1/4}$$

$$BL = 1.3h_o$$

Dónde:

BL: Borde libre (m)

F: Fetch, longitud máxima de embalse (km)

ho: Altura de ola (m)

ii) Fórmula de Molitor –Stevenson

$$h_o = 3.22(v_w F)^{0.5} + 76 - 26.9F^{0.25}$$

$$BL = 1.3h_o$$

Donde:

Vw: Velocidad de viento (pie/s)

*Tabla 3: Resguardo del borde libre de presas según U.S.B.R.*

| <b>Fetch en<br/>kilómetros</b> | <b>Resguardo<br/>normal en metros</b> | <b>Resguardo<br/>mínimo en metros</b> |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <1,6                           | 1,2                                   | 0,9                                   |
| 1,6                            | 1,5                                   | 1,2                                   |
| 4                              | 1,8                                   | 1,5                                   |
| 8                              | 2,4                                   | 1,8                                   |
| 16                             | 3,0                                   | 2,1                                   |

Fuente: US Bureau of Reclamation (1987).

#### 2.2.5.3.2. Ancho de corona:

i) Según el U.S.B.R.:

$$a_c = \frac{H}{5} + 3$$

Donde:

ac: Ancho de corona (m)

H: Altura de la presa (m)

ii) Según el Reglamento Italiano:

$$a_c = \frac{H}{4}$$

Donde:

ac: ancho mínimo 2,50 m

#### 2.2.5.3.3. Taludes exteriores

Son las pendientes y las formas de los taludes que se estima de acuerdo con la altura y a los materiales utilizados en la presa. Los valores establecidos en las siguientes tablas pueden servir como punto de partida en una alternativa, porque se deben ser individualmente analizados para determinar la estabilidad de taludes y el factor de seguridad. (Ramos Bosque, 2015)

i) Según Villaseñor, J.:

Tabla 4: Taludes exteriores para presas de tierra

| Altura de la presa | Talud Aguas Arriba<br>(H:V) | Talud Aguas Abajo<br>(H:V) |
|--------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 4,5 a 12m          | 2:1                         | 1,5:1                      |
| 12 a 15 m          | 2,5:1                       | 2:1                        |
| 30 a 45 m          | 3:1                         | 2,5:1                      |

Fuente: Villaseñor, J (1978).

ii) Según Spangler , ingeniería de suelos:

Tabla 5: Taludes mínimos para terraplenes

| TALUDES | CLASE DE SUELO Y OTRAS CONDICIONES                                                                                                                   |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1,5 : 1 | Todos los rellenos de arena ya sea se encuentren inundados o no; rellenos de suelos cohesivos de menos de 1,50m de altura y no sujetos a inundación. |
| 2 : 1   | Rellenos de suelos cohesivos de más de 1,50m pero menos de 15,0m de altura y no sujetos a inundación.                                                |
| 3 : 1   | Todos los rellenos de suelos cohesivos que no excedan de 15,0m de altura y sujetos a inundación total o parcial.                                     |

Fuente: Canovas, E.V.(1998).

#### 2.2.5.3.4. Protección de taludes

i) Según Bureau of Reclamation

Tabla 6: Espesores y granulometría para el enrocamiento de presas (protección)

| Fetch<br>(Km) | Espesor<br>Nominal (m) | Peso de la escollera (Kg) para varios Porcentajes (en Peso) <sup>1</sup> |                                  |                     |                                |
|---------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------------------|
|               |                        | Tamaño<br>Máximo                                                         | Cuando menos el<br>25% menor que | 45% a 75%<br>de _ a | No más del<br>25% menor<br>que |
| 1,6           | 0,45                   | 455                                                                      | 136                              | 4,50-136            | 4,5                            |
| 4,00          | 0,6                    | 680                                                                      | 270                              | 13,5-270            | 13,5                           |
| 8,00          | 0,75                   | 1135                                                                     | 455                              | 22,5-455            | 22,5                           |
| 16,00         | 0,9                    | 1365                                                                     | 910                              | 45,5-910            | 45,5                           |

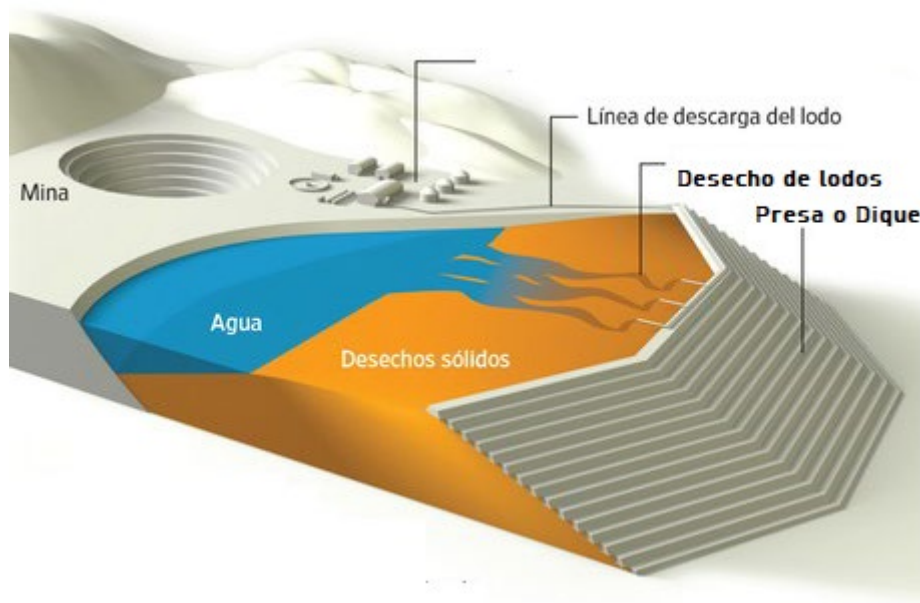
Fuente: US Bureau of Reclamation (1987).

1) La arena y el polvo de la roca deben suponer menos de 5% en peso, del total de la escollera. Para taludes de 2:1 el espesor se aumenta 6" y se usa la granulometría correspondiente. (Aburto Aburto, 2011)

### 2.2.6. Partes de la presa de relaves

Las partes esenciales de la presa de relaves son las siguientes:

*Figura 6: Partes de una presa de relaves*



Fuente: (Braja M. Das, 2013)

#### 2.2.6.1. Presa o dique:

Se trata de una estructura artificial que limita el contorno de un recinto para almacenar agua de la actividad de la minería, ya sea de una planta de tratamiento de minerales o aguas utilizadas en la explotación de la minería. (Aburto Aburto, 2011)

#### 2.2.6.2. Desecho de lodos

Los lodos de relaves son un subproducto de la minería que se genera durante el proceso de tratamiento de los minerales extraídos. Se trata de un material residual que consiste en roca molida, metales no recuperables, sustancias químicas, materia orgánica y efluentes del proceso de extracción. (Aburto Aburto, 2011)

#### 2.2.6.3. Desecho de sólidos

El relave en sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras. La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca) del yacimiento que se explota. (Aburto Aburto, 2011)

#### **2.2.6.4. Agua de relave**

El agua de relaves es el agua residual que se obtiene del procesamiento de minerales y que está parcialmente contaminada con productos químicos. (Aburto Aburto, 2011)

### **2.2.7. Estabilidad de taludes de presas**

#### **2.2.7.1. Análisis de estabilidad de taludes**

Mediante el cálculo de un factor de seguridad se procede al análisis de la estabilidad de cada talud, de forma que se pueda definir el tipo de medidas correctoras que deben ser aplicadas en caso de fallas potenciales. Para este procedimiento es necesario un estudio y geomecánico de los materiales conformantes del talud, de los posibles mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades. (Aburto Aburto, 2011)

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura en inclinación), factores geológicos (presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos relacionados con el comportamiento. Todos estos factores pueden determinar la condición de rotura a lo largo de una superficie de falla. La probabilidad de rotura y los mecanismos están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos, los cuales son intrínsecos a los materiales naturales. (Aburto Aburto, 2011)

El factor de seguridad expresa la reducción que experimentan los índices de resistencia a cortante  $c$  y  $\tan \theta$ , para alcanzar un estado de equilibrio límite. (Aburto Aburto, 2011)

#### **2.2.7.2. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo**

La resistencia al esfuerzo cortante se define como la oposición que ofrecen las partículas al desplazamiento relativo; puesto que depende de la interacción entre éstas, la naturaleza de las interacciones será la que determine la magnitud de la resistencia. (Aburto Aburto, 2011)

La resistencia al esfuerzo cortante depende de la composición del suelo. En los suelos granulares, constituidos por partículas microscópicas, la resistencia parece derivar exclusivamente de efectos de fricción entre los granos, mientras que, en los suelos en los que domina la fricción coloidal, la resistencia depende de fuerzas atractivas y repulsivas

ejercidas entre ellas. De aquí la distinción entre los suelos friccionantes o granulares, que incluyen los enrocamientos, cantos rodados, gravas, arenas, limos no plásticos y suelos cohesivos. (Aburto Aburto, 2011)

Es importante entender la naturaleza de la resistencia cortante para pronosticar los problemas de estabilidad de taludes, tales como fallas y deslizamientos. (Aburto Aburto, 2011)

### **2.2.7.3. Criterios de falla de Mohr-Coulomb**

Mohr (1900) presentó una teoría sobre la ruptura de los materiales que afirma que éstos fallan debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solamente por la presencia de un esfuerzo máximo de uno de éstos.

De tal manera que la relación funcional entre estos esfuerzos sobre un plano de falla se expresa de la forma:

$$T_f = f(\sigma)$$

Donde:

$T_f$  = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

$\sigma$  = esfuerzo normal sobre el plano de falla

La envolvente de falla definida por esta ecuación es una línea curva, pero, en la práctica es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776). Tal relación se escribe como:

$$T_f = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

$c$  = cohesión

$\phi$  = ángulo de fricción interna

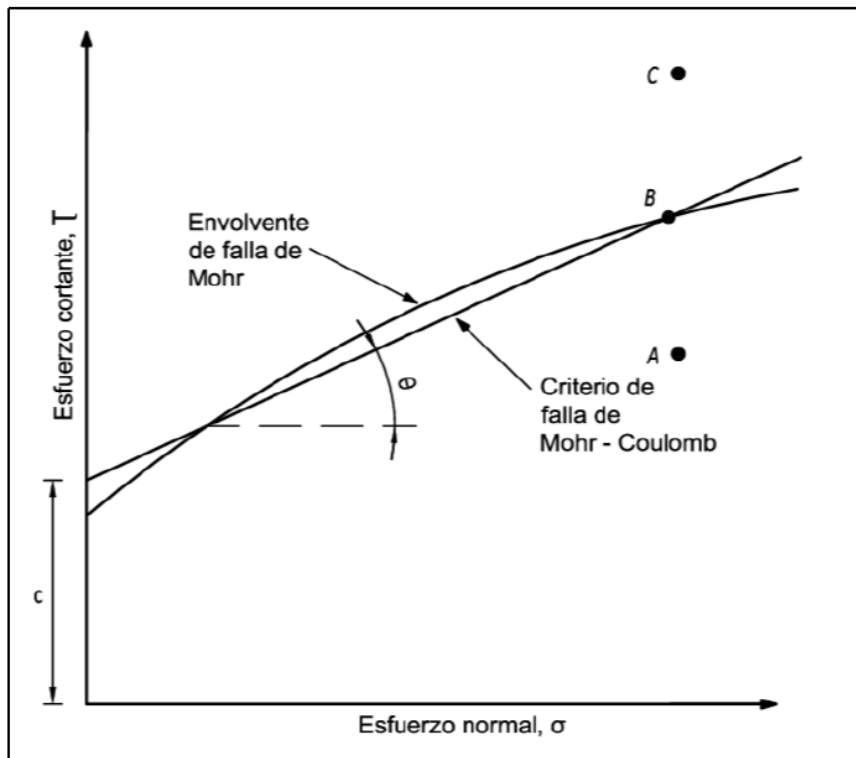
Esta ecuación es conocida como criterio de falla de Mohr-Coulomb. En la figura nos muestra que si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A, entonces no ocurrirá una falla a cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante pueden ser representados por el punto B, ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si un estado de esfuerzos se representa por el punto C, no existe falla ya que este se encuentra

arriba de la envolvente de falla, por lo que la falla cortante ya habría ocurrido antes. (Braja M. Das, 2013)

#### 2.2.7.3.1. Inclinación del plano de falla causado por cortante

La falla por cortante ocurre cuando el esfuerzo cortante sobre un plano alcanza un valor dado por la ecuación de Coulomb. Para determinar la inclinación del plano de falla respecto al plano principal mayor, siendo  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  los esfuerzos principales mayor y menor. El plano de falla EF forma un ángulo  $\phi$  con el plano principal mayor. Para determinar el ángulo  $\phi$  y la relación entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  se utiliza el Círculo de Mohr y la envolvente de falla. (Braja M. Das, 2013)

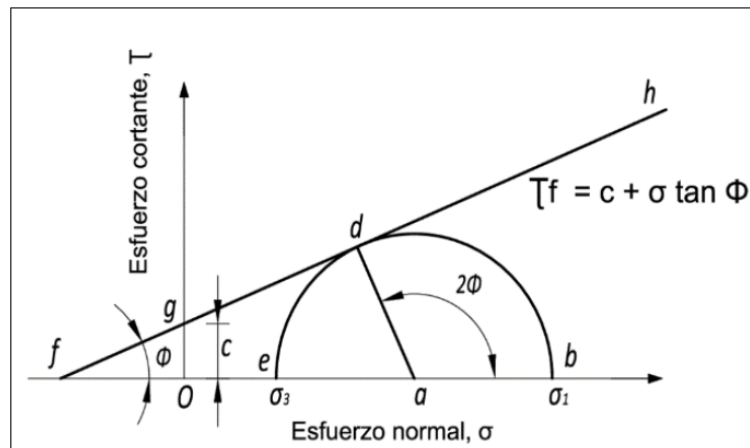
*Figura 7: Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr- Coulomb.*



Fuente: (Braja M. Das, 2013)

En la figura muestra la envolvente de falla definida por la relación “ $s=c+\sigma \tan \phi$ ”. El radio del círculo define el plano principal mayor, y la línea radial “ad” define el plano de falla.

Figura 8: Círculo de Mohr y envolvente de falla

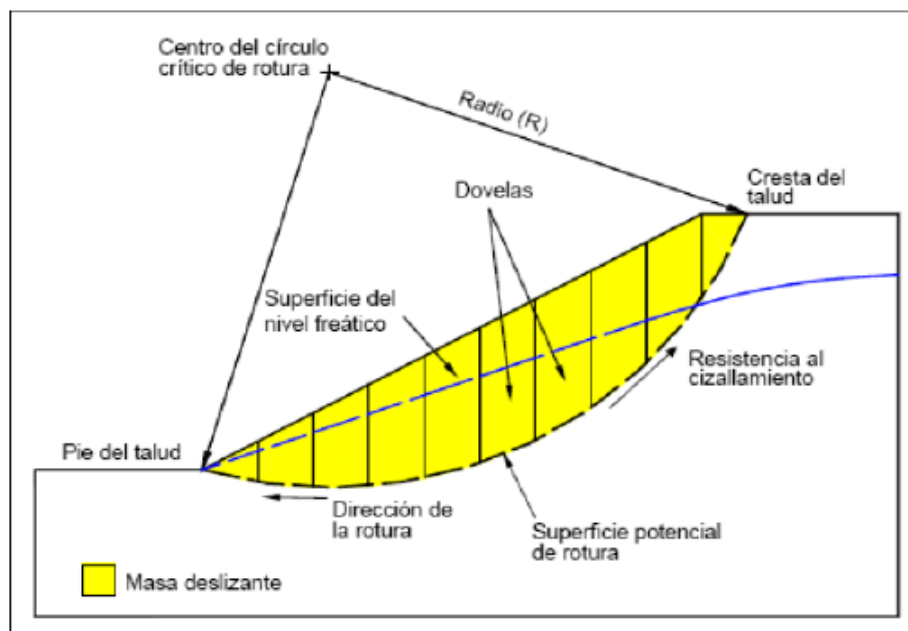


Fuente: (Braja M. Das, 2013)

#### 2.2.7.4. Método de análisis de estabilidad de taludes

El análisis se realizó por el método de equilibrio límite, este método es el más utilizado en la práctica para el cálculo de estabilidad de taludes y se basan fundamentalmente en una consideración de equilibrio plástico límite. Se han desarrollado una gran variedad de métodos, los cuales en su mayoría se basan en dividir la potencial masa de deslizamiento en un cierto número de dovelas o rebanadas, tal como se ilustra en la figura (Braja M. Das, 2013)

Figura 9: Circulo de falla de un talud.



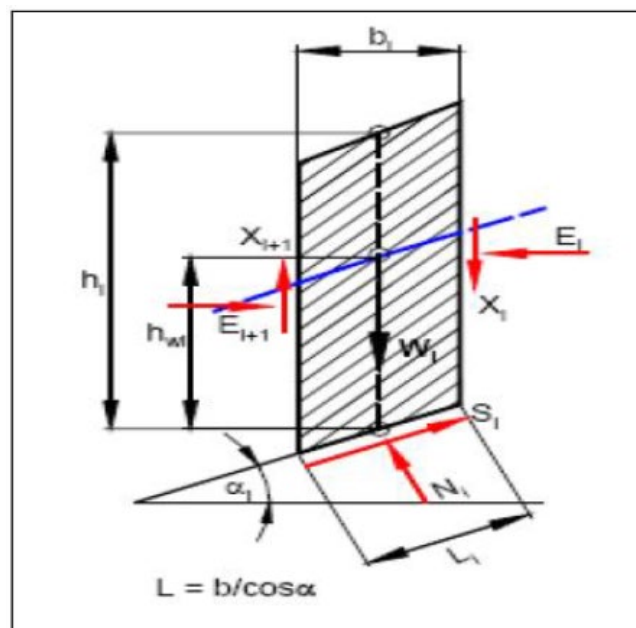
Fuente: Adaptación de (Braja M. Das, 2013)

Las fuerzas que actúan sobre cada dovela deben encontrarse en equilibrio, tanto para cada dovela, como para la totalidad de la masa deslizante. Algunos métodos consideran sólo equilibrio de fuerzas, otros sólo de momento y otros satisfacen ambas fuerzas. (Braja M. Das, 2013)

Las hipótesis del Método de Equilibrio Límite son:

- El suelo sigue una ley de comportamiento Mohr- Coulomb:  $\tau=c+\sigma'n\cdot\tan(\phi')$  y la resistencia se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de deslizamiento.
- El Factor de Seguridad (FS) de la componente cohesiva y friccionante del material es igual para todos los suelos involucrados en la superficie de deslizamiento y es el mismo para todas las dovelas. (Braja M. Das, 2013)

*Figura 10: Distribución de fuerzas en dovelas*



Fuente: adaptado de (Braja M. Das, 2013)

Los métodos de equilibrio límite más comunes son: Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Janbu Generalizado, Spencer, Morgenstern- Price, GLE, Corps of Engineers y Lowe Karafiath. De los métodos indicados, el más preciso es el de Morgenstern-Price, pero su comprensión y aplicación es laboriosa. En cambio, el de Bishop Simplificado, obtiene muy poca diferencia con los métodos precisos. Whitman &

Bailey (1967) analizaron en detalle el Método Simplificado de Bishop, concluyendo que el error cometido al utilizar este método frente a otros más rigurosos es inferior al 7%, siendo en general menor a un 2%. (Braja M. Das, 2013)

#### ***2.2.7.5. Coeficiente de seguridad de presas***

La estabilidad de los taludes se define mediante el valor del factor de seguridad. Este valor expresa la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable. (Braja M. Das, 2013)

El resultado final del factor de seguridad depende de:

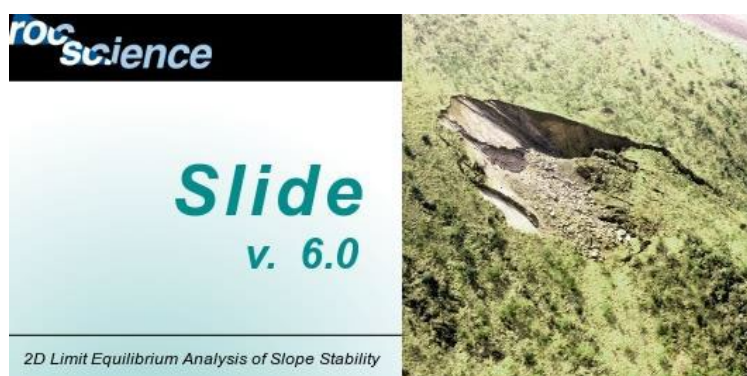
- La representatividad de los parámetros mecánicos del suelo, obtenidos en la investigación geotécnica, para los estados de carga que son necesario estudiar al diseñar el talud.
- El método de análisis de estabilidad utilizado en el cálculo del factor de seguridad La aproximación con que se definan los valores de las presiones intersticiales y la forma en que se manipulen estos en el método de análisis de estabilidad escogido.

A continuación se muestran los factores de seguridad de algunos organismos que asumen como base de sus análisis. (Braja M. Das, 2013)

#### **2.2.8. Programa SLIDE**

Slide v. 9.0 es un software, figura, que permite el análisis de estabilidad de taludes y un análisis de la filtración integrada por elementos finitos de las aguas subterráneas para condiciones de estado estacionario o transitorio. Análisis de la filtración está totalmente integrado con el análisis de estabilidad de taludes o se puede utilizar como un módulo independiente. (Rocscience, 2020)

*Figura 11: Programa Slide v.6.0.*



Fuente: <https://www.roscience.com/>

#### ***2.2.8.1. Slide para el análisis de estabilidad de taludes.***

Con este software se podrá analizar los límites de equilibrio en 2D para modelación con tipos heterogéneos de suelo, geometría de la superficie de deslizamiento estratigráfico y complejo, y las condiciones de presión del agua intersticial variables mediante una amplia selección de modelos de suelo. Además destaca los diferentes modelos y métodos de análisis, tal es el caso de la resistencia del material de roca y suelo por Mohr- Coulomb, el cual mediante procesos algorítmicos y de interacción permitirá obtener el factor de seguridad más crítico en una superficie. (Rocscience, 2020)

#### ***2.2.8.2. Slide para el análisis de filtración.***

Es un software que permite al usuario utilizar técnicas de elementos finitos como herramienta numérica, para analizar el flujo en un modelo bidimensional a través de medios porosos y calcular el exceso de las presiones de poro en un problema de disipación de presiones en materiales de suelo y roca. Permite también asignar condiciones de borde al modelo y propiedades específicas a los materiales. El programa está formulado solo para flujos gobernados por la ley de Darcy, mediante la cual la cantidad de agua que pasa a través de un medio poroso es proporcional a la permeabilidad del medio, al gradiente hidráulico y al área a través de la cual discurre el flujo. (Rocscience, 2020)

### **2.3. Impacto ambiental sobre los relaves**

Mientras la percolación generalmente disminuye y eventualmente cesa después del término de la descarga de relaves activos, en algunos casos puede ser necesario tomar precauciones especiales relacionadas con la recuperación. En particular, la oxidación de la pirita aumenta considerablemente en la zona no saturada. Por este motivo, ya que la

superficie freática disminuye en una represa abandonada, la oxidación de piritas, si es que existen en los relaves, se acelerará en gran medida, produciendo pH reducido y liberación incrementada de contaminantes metálicos. (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina – MINEM Rennat, 1997)

Estos contaminantes producidos por la oxidación, potencialmente mucho más nocivos que los presentes durante la operación de la represa, pueden ser lixiviados dentro del agua subterránea por infiltración de precipitación sobre la superficie de la represa. (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina – MINEM Rennat, 1997)

Para prevenir la lixiviación de contaminantes en tales casos, frecuentemente se requiere una cubierta de arcilla sobre la superficie de la represa en abandono y recuperación, junto con la nivelación para prevenir el empozamiento de la escorrentía. En el caso particular de los relaves ricos en pirita, se debería considerar la opción de mantener condiciones saturadas en el depósito después del abandono para prevenir la oxidación a largo plazo. La vegetación es la más común y generalmente la opción de estabilización preferida para depósitos de relaves. Si se puede establecer una cubierta vegetativa que se perpetúe por sí sola, no sólo se puede minimizar la erosión por agua y viento, sino también se puede hacer que el depósito vuelva a tener cierta semejanza con su apariencia original y al uso de tierra. “En climas favorables y para relaves de composición química favorable, la revegetación puede necesitar sólo poco esfuerzo o puede ocurrir por procesos naturales durante un periodo de tiempo razonablemente corto. Sin embargo, en climas áridos o para relaves que tienen bajo pH, o altas concentraciones de metales pesados o sales, el establecimiento de vegetación puede ser un proceso largo, difícil y costoso. A pesar de que la revegetación ha sido planeada para muchos depósitos actualmente activos, se ha llevado a cabo relativamente pocos programas de recuperación de relaves con un término exitoso”. (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina – MINEM Rennat, 1997)

## **CAPITULO III:**

### **III. DISEÑO DE PRESA DE RELAVES**

#### **3.1. Topografía del terreno de la presa de relaves**

##### **3.1.1. Planeamiento de topografía**

Para el desarrollo del planeamiento de la topografía, se realizó trabajo de identificación de la zona en gabinete para posteriormente realizar los trabajos de campo que se describen a continuación:

- Se realizó una coordinación previa con los técnicos a cargo de la planta para realizar los trabajos de campo.
- Se realizó la identificación de los límites de la planta y donde se desarrollará el proyecto de la presa de relaves.
- Asimismo, se realizó el levantamiento topográfico del terreno ya identificado donde se realizará la presa de relaves.
- Culminado el levantamiento topográfico se procederá a elaborar la gráfica de la topografía en sistema de coordenadas UTM de WGS84

### 3.1.2. Recursos utilizados

Para el levantamiento topográfico se utilizó los siguientes recursos:

#### 3.1.2.1. Personal

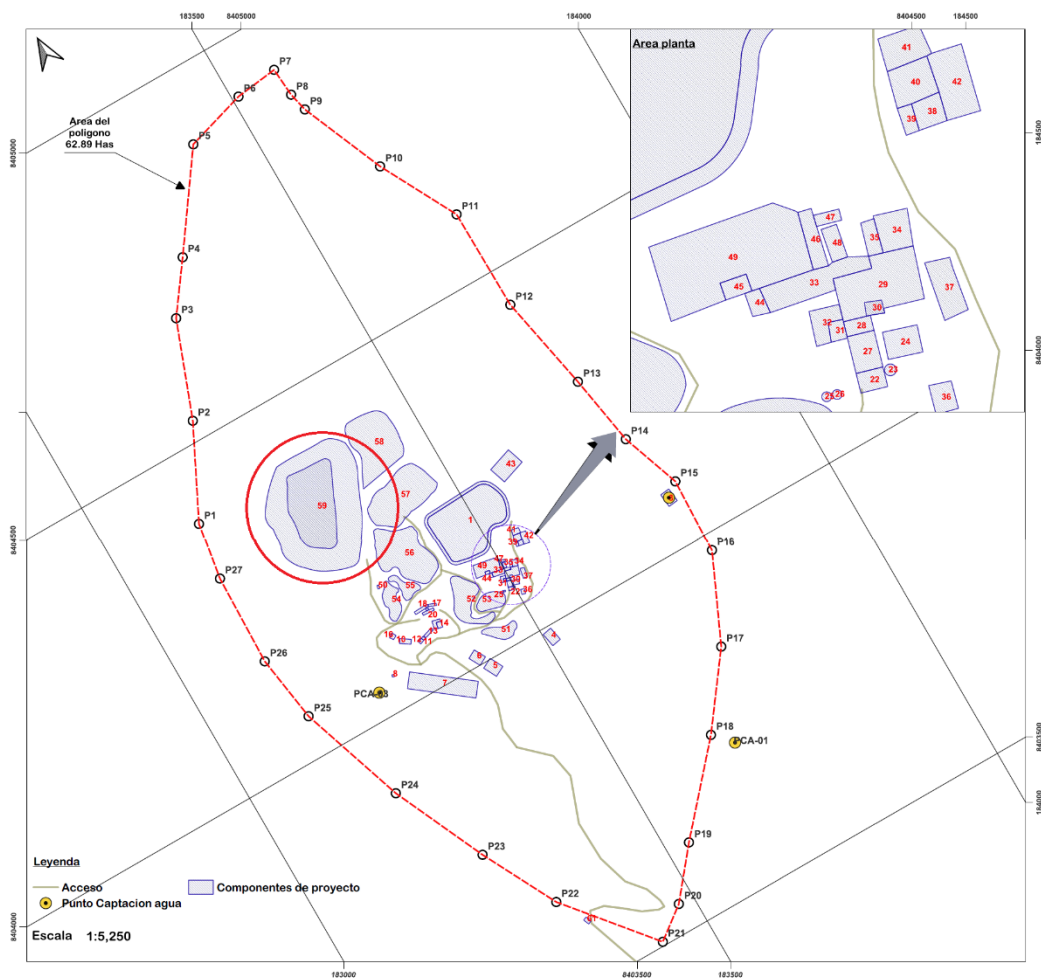
- Técnico en topografía
- Ayudantes primeros
- Dibujantes

#### 3.1.2.2. Equipos

- Estación total marca LEICA TS07-5" R500
- 3 prismas
- 02 Radios marca Motorola

### 3.1.3. Ubicación de la relavera

*Figura 12: Ubicación de la construcción de la presa de relaves*



Fuente: Propia

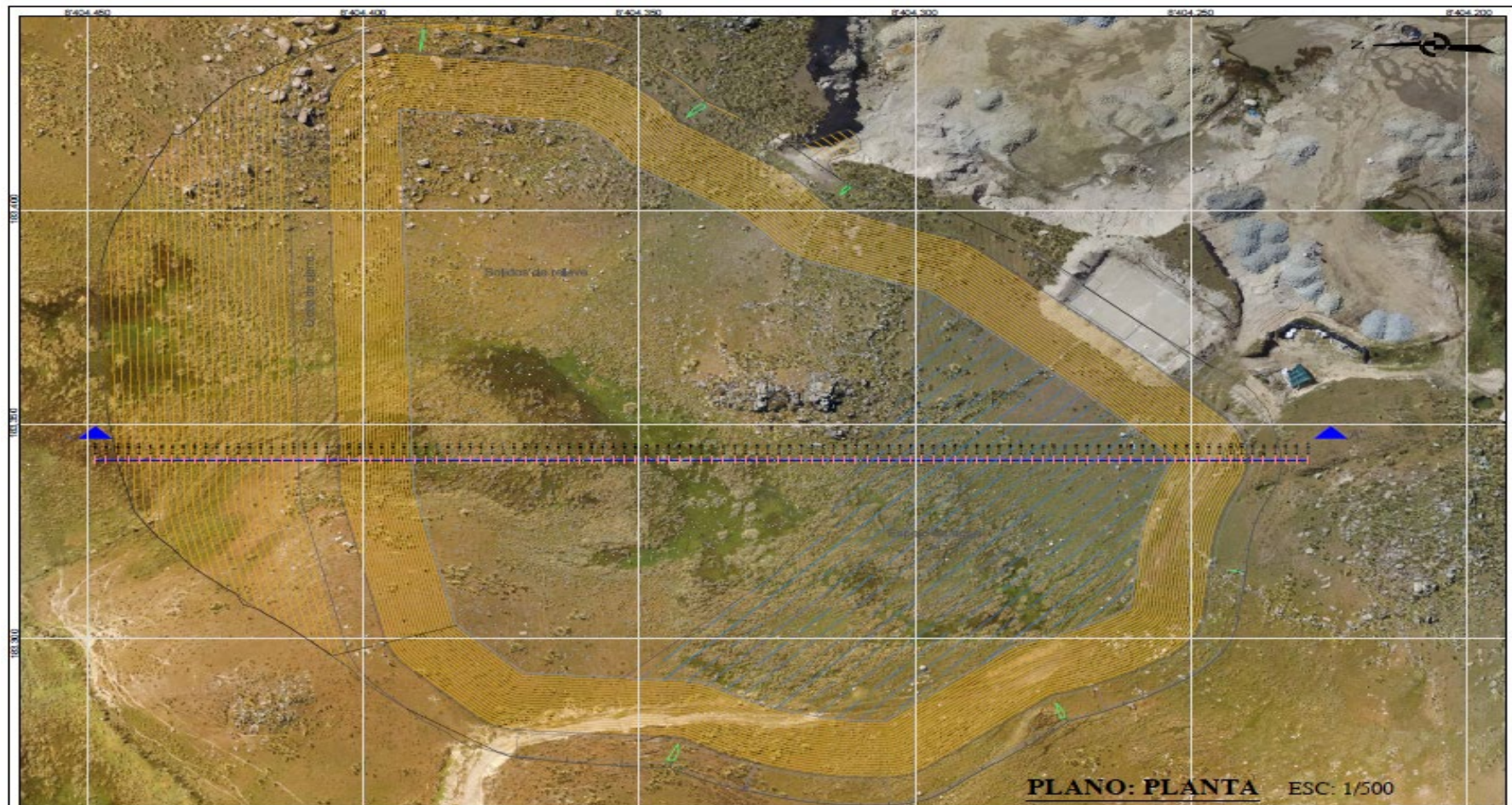
#### **3.1.4. Levantamiento topográfico**

El área del proyecto tiene una topografía de tipo colinado con pendientes que varían desde 16% a 30%, con depresiones lineales donde se pueden observar pequeños cursos de agua en las quebradas más profundas. Para la construcción de la presa de relaves se ha tomado en cuenta las variaciones de pendientes en el área descartando las áreas de mayor influencia hídrica (bofedales) en el área del proyecto.

Para garantizar una representación precisa de las características del terreno, se llevó a cabo un levantamiento topográfico de detalle en el área seleccionada para la construcción de la presa de relaves, a incluir una superficie de 2 hectáreas. Se realizaron perfiles longitudinales y transversales, lo que permitió calcular con precisión los volúmenes de almacenamiento y el movimiento de tierras.

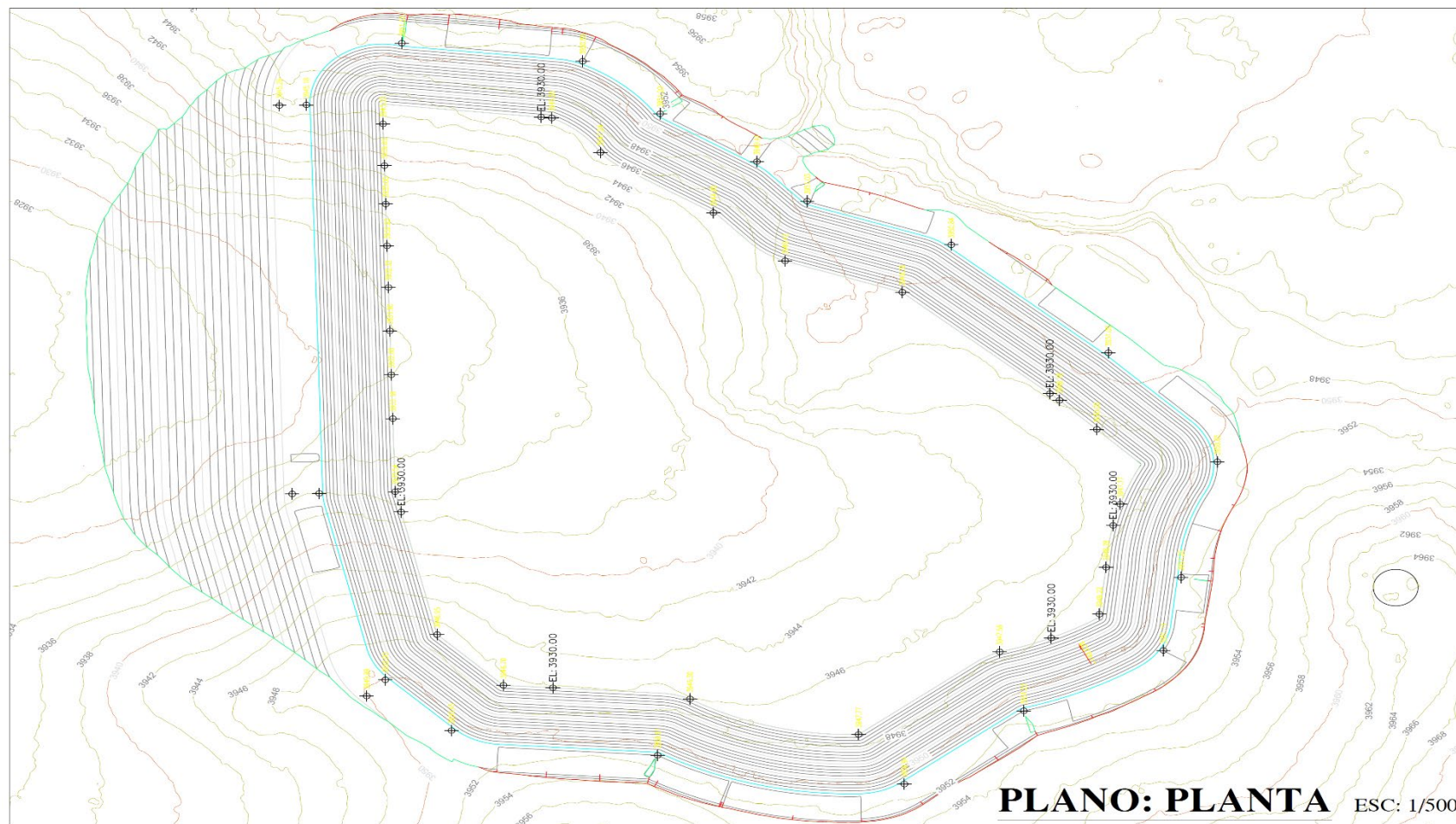
Se empleó una escala de 1:500 para la planta y de 1:1500 para los perfiles, tanto en sentido horizontal como vertical. Este levantamiento facilitó la ubicación del dique de cierre del depósito proyectado, así como de los demás elementos de la infraestructura, considerando además las particularidades naturales del terreno. Las curvas de nivel con intervalo de un metro brindaron una interpretación adecuada de la topografía.

*Figura 13: Levantamiento topográfico de proyección de presa de relaves*



Fuente: Propia

*Figura 14: Levantamiento topográfico de proyección de presa de relaves a curvas de nivel*



Fuente: Propia

### **3.2. Geología del terreno de la presa de relaves**

n las proximidades del proyecto se identifican dos sistemas de fallas.

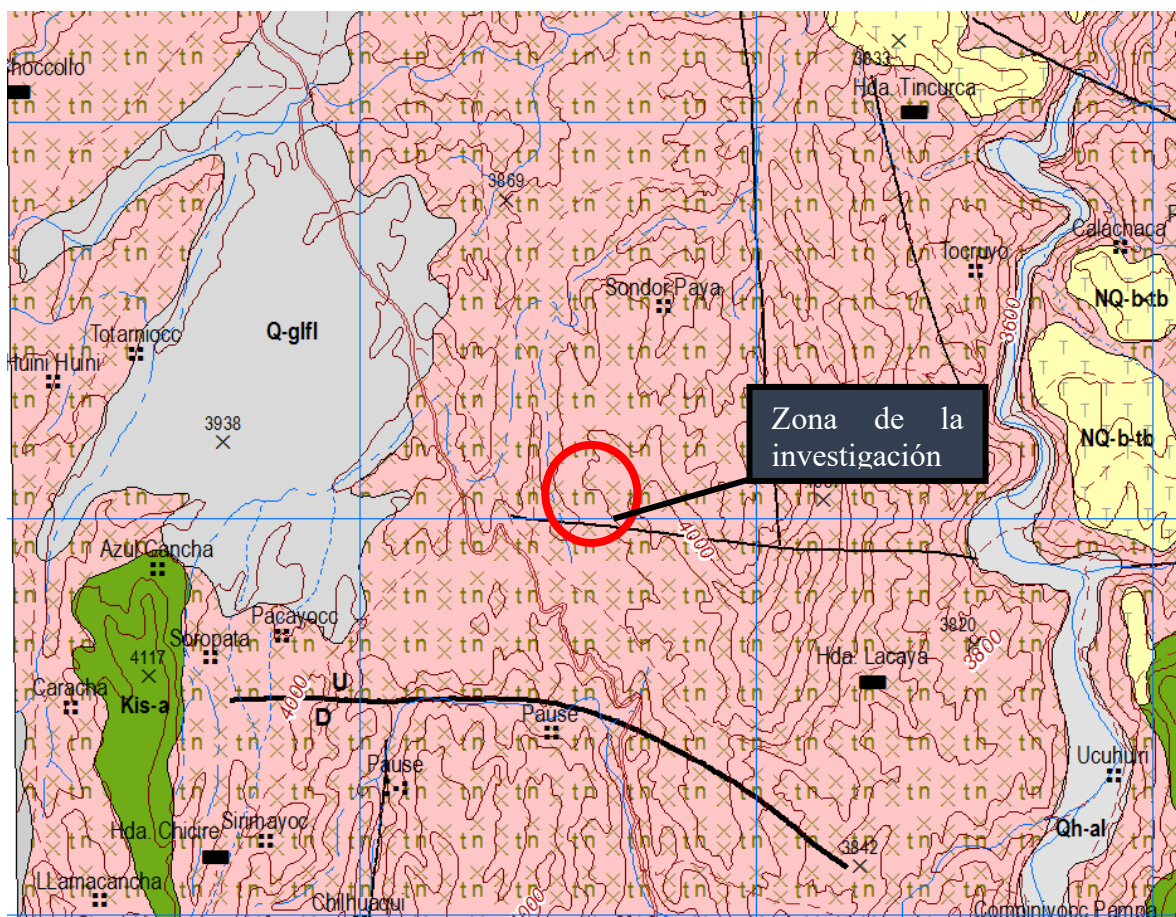
El primero corresponde a un fallo anticlinal de estructura sencilla, asimétrica y con un ligero acortamiento hacia el noreste. Su núcleo está compuesto por el Grupo Copacabana en su sector septentrional, donde se encuentra cubierto por el Grupo Mitu y finaliza en las estructuras del valle de Huascanayo. Este anticlinal posee una amplitud kilométrica y sus flancos presentan variaciones menores en la inclinación.

El segundo sistema se localiza en la zona comprendida entre Huancané-Livitaca y Apurímac. Aunque no está estrictamente delimitado por los valles, recibe esta denominación debido a que estos actúan como referencias geográficas destacadas y, de cierto modo, enmarcan una zona morfoestructural.

El rasgo más notable se observa en los alrededores de la señal de Quecha Grande, donde las capas con un nivel de inclinación centrífuga se extienden hasta los valles de Apurímac y Livitaca, resaltando estructuralmente la disyunción columnar.

En cuanto al plegamiento, los elementos más significativos corresponden al Grupo Murco y la Formación Arcurquina. Los cuerpos de mayor volumen y extensión se encuentran entre los valles de Velille y Livitaca, mientras que al oeste del primero las exposiciones son más reducidas y aisladas. En todos los casos, el contacto inferior se caracteriza por ser de naturaleza intrusiva..

Figura 15: Geología de la zona de la investigación



Fuente: IMGEMET

Figura 16: Columna estratigráfica de la zona de estudio

| ERATEMA   | SISTEMA     | SERIE       | UNIDAD LITOESTRATIGRAFICA | GROSOR (m.) | LITOLOGIA | DESCRIPCION                                                                                    |
|-----------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CENOZOICO | CUATERNARIO | PLEISTOCENO | Fm. Azángaro              |             |           | Limolitas y areniscas limosas beige<br>Disc. eros.                                             |
|           |             |             | Gpo. Barroso              | ±500        |           | Derrames andesíticos, piroclastos y brechas volcánicas.<br>angularidad                         |
|           | NEOGENO     | PLIOCENO    | Gpo. Sillapaca            | 50<br>500   |           | Tobas, brechas volcánicas, lavas.                                                              |
|           |             |             | Fm. Palca                 |             |           | Tobas riolíticas riolíticas.<br>Disc. ang.                                                     |
|           |             |             | Fm. Tinajani              | ±1000       |           | Conglomerados poliméticos                                                                      |
|           |             | MIOCENO     | Gpo. Tacaza               | ±3600       |           | Flujos andesíticos, tobas, brechas y areniscas vulcanoclasticas.<br>Disc. ang.                 |
|           |             |             |                           |             |           |                                                                                                |
|           | PALEOGENO   | OLIGOCENO   | Gpo. Puno                 | 100<br>3000 |           | Conglomerados, areniscas de grano grueso, limolitas y delgados niveles tobáceos.<br>Disc. ang. |
|           |             | EOCENO      |                           |             |           |                                                                                                |
|           |             | PALEOCENO   |                           |             |           |                                                                                                |

Fuente: IMGEMET

### 3.3. Estudio geotécnico del área donde se construirá la presa de relaves

El estudio de geotecnia fue llevado a cabo por una consultora externa, que realizó sondajes y ensayos in situ con el objetivo de determinar los parámetros de resistencia al corte de los distintos materiales presentes en la conformación de la presa.

#### 3.3.1. Ensayos de densidad

En el siguiente cuadro se presentó los ensayos de densidad in situ.

*Tabla 7: Ensayos de densidad*

| Sector                  | Sondaje | Densidad Natural (gr/cm3) | Densidad Seca (gr/cm3) | Humedad (%) |
|-------------------------|---------|---------------------------|------------------------|-------------|
| Pie derecho del dique   | 01      | 2.61                      | 2.38                   | 8.5         |
| Pie izquierdo del dique | 02      | 2.58                      | 2.46                   | 7.6         |
| Vaso                    | 03      | 2.56                      | 2.46                   | 6.8         |

Fuente: Propia

#### 3.3.2. Caracterización geotécnica de las propiedades físico – mecánicas

En el siguiente cuadro se evidencia los parámetros a ser utilizados de acuerdo al tipo de material según los ensayos de densidad de campo, así como los ensayos de compresión triaxial.

##### 3.3.2.1. Suelo de cimentación.

El suelo de cimentación está conformado por relleno de morrón y estructuras de roca de dureza media, de los que se realizó el estudio de suelos a la resistencia del corte obteniendo los siguientes resultados:

Donde:

$C'$  (KPa) : Cohesión

$\phi'$  (°) : Angulo de fricción

(KN/m3) : Densidad del material

Tabla 8: Caracterización de suelo de cimentación

| Descripción          | Densidad Natural<br>(KN/m3) | Parámetros de Resistencia |             |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|
|                      |                             | C' (KPa)                  | $\phi'$ (°) |
| Suelo de cimentación | 23                          | 30                        | 30          |

Fuente: propio

### 3.3.2.2. Relleno del dique.

Se realizó los ensayos de resistencia al corte al relleno que se utilizara en la conformación del dique obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9: Caracterización de relleno de dique

| Descripción       | Densidad Natural<br>(KN/m3) | Parámetros de Resistencia |             |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|
|                   |                             | C' (KPa)                  | $\phi'$ (°) |
| Relleno del dique | 20                          | 25                        | 40          |

Fuente: Propio

### 3.3.3. Determinación de capacidad portante del suelo

La determinación de la capacidad portante del suelo en la cimentación del dique se llevó a cabo conforme al estudio geotécnico desarrollado por la empresa. Dado que esta información es de carácter confidencial, se presentará únicamente el procedimiento de obtención de los resultados. Este cálculo se efectuó aplicando el método de Terzaghi, cuya formulación se detalla a continuación.:

Tabla 10: Datos del estudio de suelos

|                                          |                                                    |             |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------|
| Profundidad de desplante, Df             | Metros                                             | <b>3.0</b>  |
| Peso Volumétrico del suelo; Gm           | Ton/m3                                             | <b>2.3</b>  |
| Cohesión del suelo, c                    | Ton/m2                                             | <b>3.0</b>  |
| Ángulo de fricción interna del suelo, Fi | Grados                                             | <b>30</b>   |
| Ancho o Radio del cimient; B ó R         | Metros                                             | <b>50.0</b> |
| Tipo de suelo                            | 1-Arcilloso firme / 2-Arcilloso blando / 3-Arenoso | <b>1</b>    |
| Factor de seguridad, F.S.                | (3.5 / 3.0 / 2.5)                                  | <b>3.0</b>  |

Fuente: Estudio de suelo de la Empresa

*Tabla 11: Factores dependientes del ángulo de fricción*

|                                               |              |
|-----------------------------------------------|--------------|
| <i>Factor de cohesión, <math>N_c</math></i>   | <i>37.16</i> |
| <i>Factor de sobrecarga, <math>N_q</math></i> | <i>22.46</i> |
| <i>Factor de piso, <math>N_g</math></i>       | <i>19.13</i> |

Fuente: Estudio de suelo de la Empresa

Capacidad de carga portante,  $q_c$ :

$$q_c = x * N_c + G_m * D_f * N_q + 0.5 * G_m * B * N_g$$

Capacidad de carga admisible;  $q_a$ :

$$q_a = \frac{q_c}{FS}$$

$$c * N_c = 111.5$$

$$G_m * D_f * N_q = 155.0$$

$$0.5 * g * B * N_g = 1100.0$$

$$q_c, (\text{Ton/m}^2) = 1366.4$$

$$q_a, (\text{Ton/m}^2) = 455.5$$

La capacidad de carga portante del suelo es de 1366.40 ton/m<sup>2</sup>.

### **3.4. Estudio Hidrogeológicos del área donde se construirá la presa**

De acuerdo al mapeo hidrológico realizado por la consultora sobre las fuentes de agua subterráneas, del cual se obtiene la información técnica para desarrollar el proyecto de la construcción de la presa de relaves, se evidencio una fuente de agua como manantial el cual genera una pequeña corriente de agua, que en época de estiaje se seca.

Se ha identificado el manantial 01, que tiene temperaturas que van de 11 °C a 12 °C, con un Ph de 7.3, con sólidos disueltos de 350ppm, con una conductividad eléctrica de 750  $\mu\text{S/cm}$ .

### 3.4.1.1. *Parámetros hidrogeológicos*

Según los detritos recuperados de la perforación realizada, y de acuerdo a la geología local de la zona del estudio se logró identificar el siguiente tipo de unidades hidrogeológicas:

*Tabla 12: Paramentos hidrogeológicas*

| <b>Unidades<br/>Hidrogeológicas</b> | <b>Litología</b>         | <b>Permeabilidad</b> |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Acuífero semiconfinado              | Arenas, limos, arcillas. | Media                |

Fuente: Estudio de gestión ambiental de Consorcio Machupicchu Gold

### 3.4.1.2. *Porosidad del suelo*

La porosidad del suelo es determinada de forma indirecta, que es el coeficiente del volumen poroso ( $\emptyset$ ) que está en relación a la densidad natural o real del suelo entre la densidad aparente de la muestra; muestra obtenida al realizar el estudio de suelos. Estos volúmenes son utilizados a partir del estudio de suelos realizado por parte de la empresa, que solo ha limitado a compartir como dato de resultado, para lo cual en esta investigación procederemos a demostrarlo.

$$\emptyset = \frac{Dr - Da}{Dr} \times 100\%$$

Donde:

$\emptyset$  : Índice de porosidad

Dr : Densidad real del suelo

Da : Densidad aparente de la muestra

La densidad aparente esta dada por la formula siguiente:

$$Da = \frac{Pm}{Vs}$$

Donde:

Da : Densidad aparente de la muestra

Pm : Peso de la muestra

Vs : Volumen de la muestra

De acuerdo a los datos proporcionados, el peso de la muestra es de 150 gramos y el volumen de la muestra es 96.15 cm<sup>3</sup>.

$$Da = \frac{150 \text{ gr}}{96.15 \text{ cm}^3}$$

$$Da = 1.56 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

De acuerdo al cálculo realizado tenemos que la densidad aparente de la muestra es 1.56gr/cm<sup>3</sup>, y de acuerdo a los datos proporcionados por la empresa la densidad natural o real del suelo es de 2.61gr/cm<sup>3</sup>, por lo que relacionamos para hallar el índice de la porosidad del suelo.

$$\emptyset = \frac{2.61 - 1.56}{2.61} \times 100\%$$

$$\emptyset = 0.40 \times 100\%$$

$$\emptyset = \mathbf{40\%}$$

De acuerdo al estudio y cálculo realizado del estudio de suelos, el índice de porosidad del suelo equivale al 40%

### **3.5. Diseño de ingeniería de la presa de relaves**

#### **3.5.1. Componentes estructurales de la presa**

La presa de relaves de la planta de tratamiento de minerales BEDREGAL, debe estar conformado por los siguientes componentes:

- Dique de contención, construido con el material de excavación (tierra de préstamo).
- Sistema de conducción de relave, de la planta a la presa de relaves.
- Sistema de drenaje superficial, canal de coronación.
- Impermeabilización del vaso, con geomembrana HDPE.
- Sistema de drenaje de infiltración, para la evacuación del agua natural por debajo del vaso de la presa.

### **3.5.2. Criterios para el diseño de la presa de relaves**

#### ***3.5.2.1. Consideraciones para el diseño de la presa de relaves***

Se contemplan principalmente las siguientes consideraciones:

- Ubicación del área para la presa de relaves.
- Topografía del área.
- Estabilidad contra el desbordamiento.
- Estabilidad contra el flujo incontrolado
- Estabilidad contra la erosión interna.
- Producción y volúmenes proyectados.

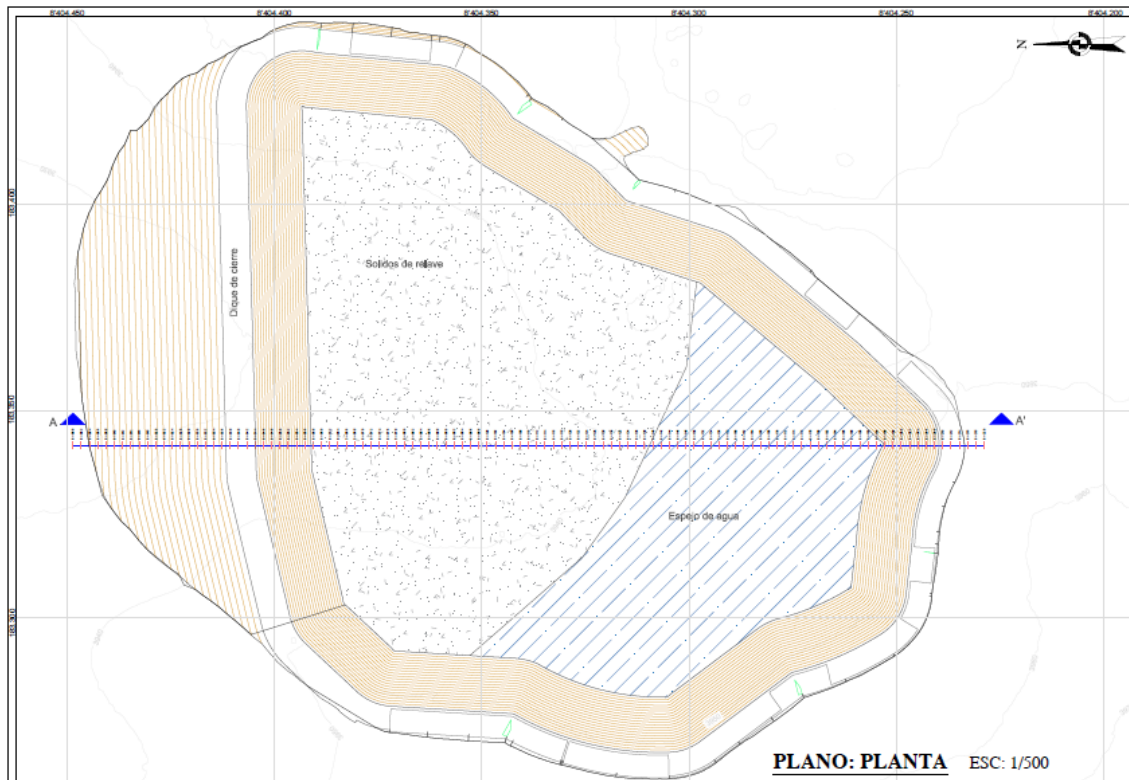
#### ***3.5.2.2. Ubicación del área de la presa de relaves.***

La ubicación propuesta del área de la presa de relaves 03, se encuentra ubicado a 250 metros al noroeste de la planta de beneficio, sobre una hondonada o depresión natural del terreno la cual coadyuvaría a que los trabajos de movimiento de tierras sean las más óptimas posibles en términos de presupuesto y disponibilidad de maquinaria, así como la conformación del dique el más corto en longitud para asegurar la estabilidad del mismo.

#### ***3.5.2.3. Topografía del área***

El área del proyecto tiene una topografía de tipo colinado con pendientes que varían desde 16% a 30%, con depresiones lineales donde se pueden observar pequeños cursos de agua en las quebradas más profundas. Para la construcción de la presa de relaves se ha tomado en cuenta las variaciones de pendientes en el área descartando las áreas de mayor influencia hídrica (bofedales) en el área del proyecto.

*Figura 17: Topografía del área del estudio del diseño de la presa de relave*



Fuente: Propio

#### **3.5.2.4. Estabilidad frente al desbordamiento**

El manejo inadecuado del flujo de agua superficial puede provocar el sobrepaso de la corona, lo que podría comprometer la integridad estructural de la presa de relaciones. Por ello, la altura de la presa debe incluir un borde libre mínimo que permita contener tanto la descarga del flujo de relaves como el volumen de agua proveniente de precipitaciones y escorrentías que ingresan desde la cuenca de drenaje tributaria.

Asimismo, si el diseño del proyecto contempla la captación de caudales extraordinarios, será necesario incorporar una infraestructura hidráulica adecuada para su evacuación. Generalmente, esto se logra mediante la implementación de un vertedero o un canal de coronación perimetral, evitando así que estas aguas ingresen al depósito de relaves.

### ***3.5.2.5. Estabilidad frente a flujo incontrolado***

#### **Factores que generan flujo incontrolado**

El descontrol del flujo de agua subterránea puede ocasionar tres problemas principales:

- Inestabilidad del talud en la zona aguas abajo.
- Erosión interna o fenómeno de tubificación.

#### **Control de la estabilidad del talud exterior**

Dado que el nivel freático influye significativamente en la estabilidad global de la presa, tanto en condiciones estáticas como sísmicas, es fundamental mantener lo más bajo posible en las proximidades de la estructura.

El principio básico en el diseño de presas para controlar el nivel freático es que la disposición de los materiales debe facilitar un incremento progresivo de la permeabilidad en la dirección del flujo. Esto permite que el nivel freático descienda gradualmente, reduciendo los riesgos de inestabilidad.

#### **Control de la erosión interna o tubificación.**

La distribución y el tipo de materiales dentro de la presa no solo deben regular el nivel freático, sino también cumplir con los requisitos de filtración para evitar la migración de partículas finas de suelo o relaves hacia zonas con materiales más horribles.

Frecuentemente, se presentan problemas de erosión interna y filtración deficiente en presas de familiares cuando se emplea desmonte de mina como material constructivo en contacto directo con los familiares.

El uso de filtros sintéticos (geotextiles) como alternativa a los filtros tradicionales de arena resulta especialmente ventajoso en sitios donde los materiales naturales son escasos o costosos de extraer. Además, la durabilidad de los filtros sintéticos suele ser suficiente para la vida útil relativamente corta de muchas presas de relaves.

### ***3.5.2.6. Estabilidad contra deslizamientos.***

En presas de relaves, el deslizamiento inicial suele ser de tipo rotacional y es el principal mecanismo de falla en los taludes, excepto en los casos en que la falla es inducida por licuación. Posteriormente, estos deslizamientos pueden evolucionar hacia flujos de

material. Para evaluar la estabilidad de la presa, se realizarán análisis bajo las siguientes condiciones:

- Al finalizar la construcción.
- Durante la construcción por etapas.
- A largo plazo.
- Considerando la estabilidad sísmica.

#### ***3.5.2.7. Capacidad de almacenamiento de la presa de relaves***

La capacidad de almacenamiento de la presa de relaves se ha calculado considerando la capacidad instalada y operativa del procesamiento de minerales, así como la topografía del terreno donde se ubica el vaso de la presa. Para ello, se utilizó el software AutoCAD Civil 3D, aplicando el método de diferenciación de superficies.

Según su configuración geométrica, la presa de relaves tendrá una capacidad de almacenamiento de 335.000 m<sup>3</sup>.

#### ***3.5.2.8. Volumen total de almacenamiento en la presa de relaves.***

El volumen total de almacenamiento de la presa de relaves, incluyendo la fracción fina y gruesa, ha sido determinado desde la cota 3930.0 msnm (base del depósito de relaves) hasta la cota 3949.5 msnm (cresta de la presa), alcanzando un volumen total de 335,000 m<sup>3</sup>.

*Tabla 13: Volumen total de almacenamiento de la presa de relave*

| <b>COTA<br/>(msnm)</b> | <b>VOLUMEN DEL VASO<br/>(m3)</b> |
|------------------------|----------------------------------|
| 3930.0                 | 0.00                             |
| 3950.0                 | 335,000.00 (capacidad útil)      |
| 3951.0                 | 351,000.00 (volumen total)       |

Fuente: propio

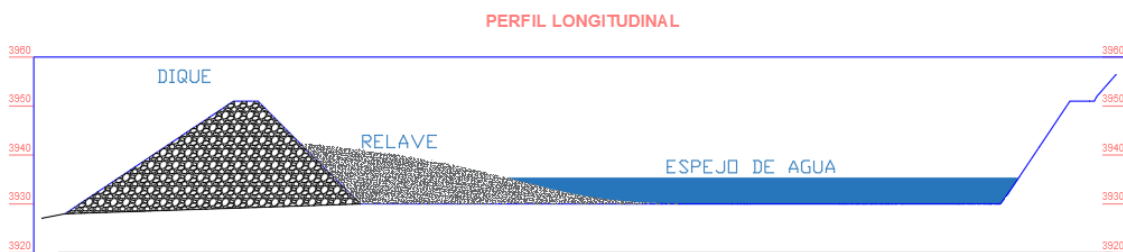
### 3.5.3. Parámetros de diseño de la presa de relaves

#### 3.5.3.1. Diseño hidráulico

Tras el análisis preliminar de las características de los relaves, el volumen del depósito y la composición del suelo en el área del proyecto, se ha determinado que no se generarán empujes hidrostáticos significativos. Considerando las propiedades de los materiales presentes en la zona, el diseño del dique se realizará con el mismo material (tierra) y contará con los siguientes parámetros:

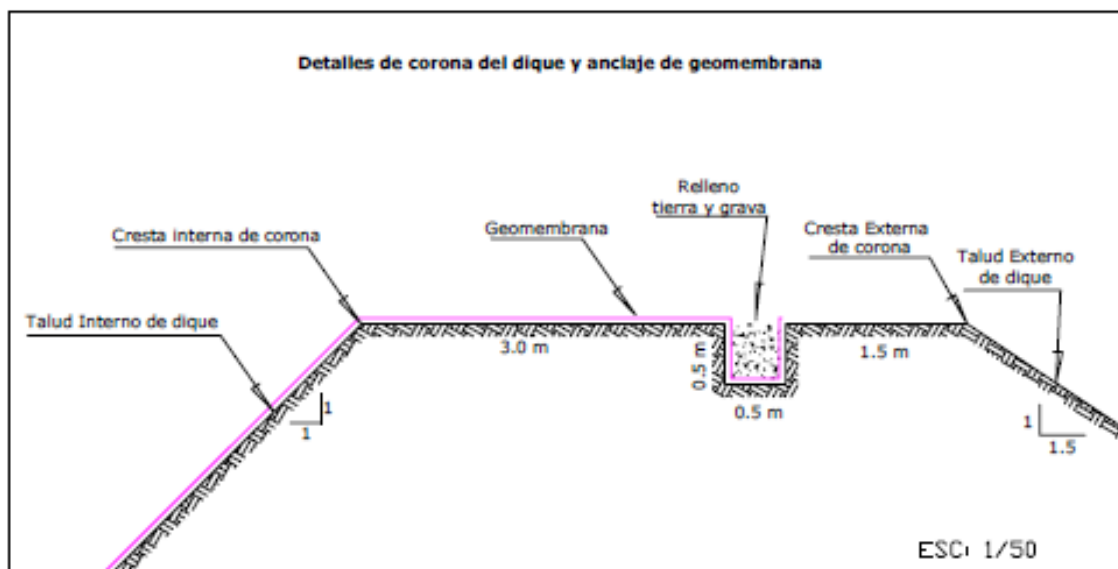
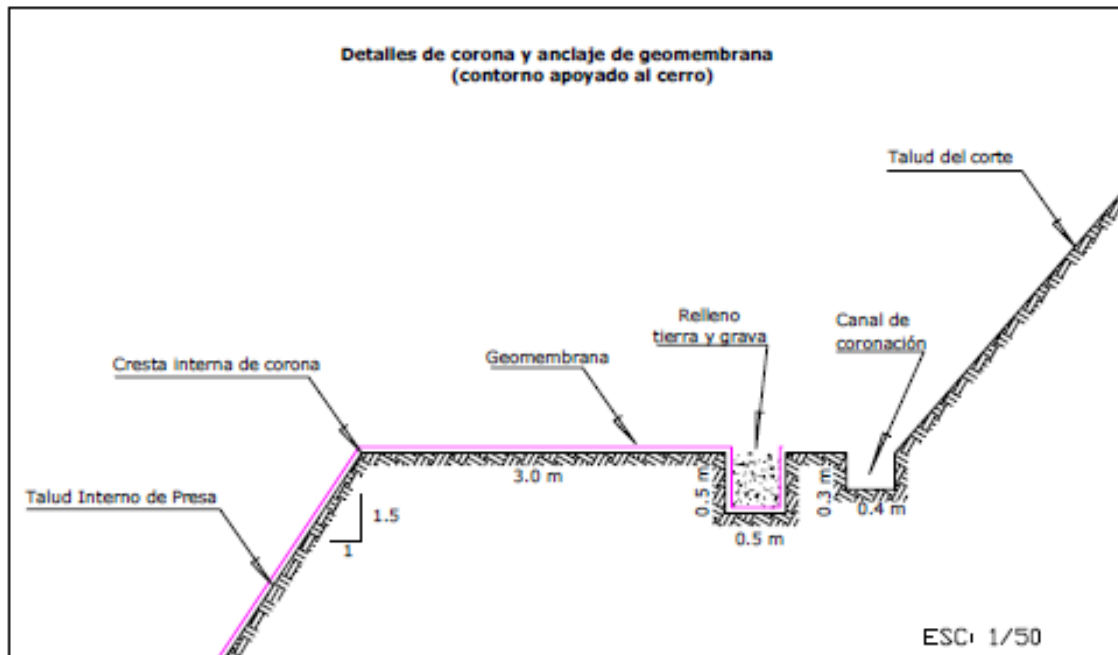
- La altura del dique de cierre es de 21 m; la longitud de dique de 130 metros, el volumen de tierra requerido es de 52584.00 m<sup>3</sup>.
- Volumen útil de vaso es de 335,000 m<sup>3</sup>.
- El ancho de la corona del dique por maniobrabilidad de equipos en la construcción del mismo tendrá 5 metros.
- Talud interno del vaso 1:1, talud externo del dique de cierre 1.5:1
- El área a impermeabilizarse con geo-membrana es de 34,859 m<sup>2</sup> y su especificación es: HDPE = 1.5 mm ancho de rollo 7.5 m y longitud 150 m.
- Se ha considerado borde libre de 1 m por cuanto el vaso contendrá agua, de manera que aguas no logren superar la altura libre cuando ésta se haya llenado.
- El talud, la base y la corona estarán cubiertas por geomembrana, con lo cual se evitará la filtración de posibles residuos líquido o el propio relave hacia los suelos fuera del depósito.
- Se considera un canal de coronación de 0.4 m de ancho por 0.30 m de profundidad en el borde de la corona que hace contacto con el talud del terreno natural para evacuar las aguas en temporadas de avenida.

*Figura 18: Perfil longitudinal de la Presa de relave*



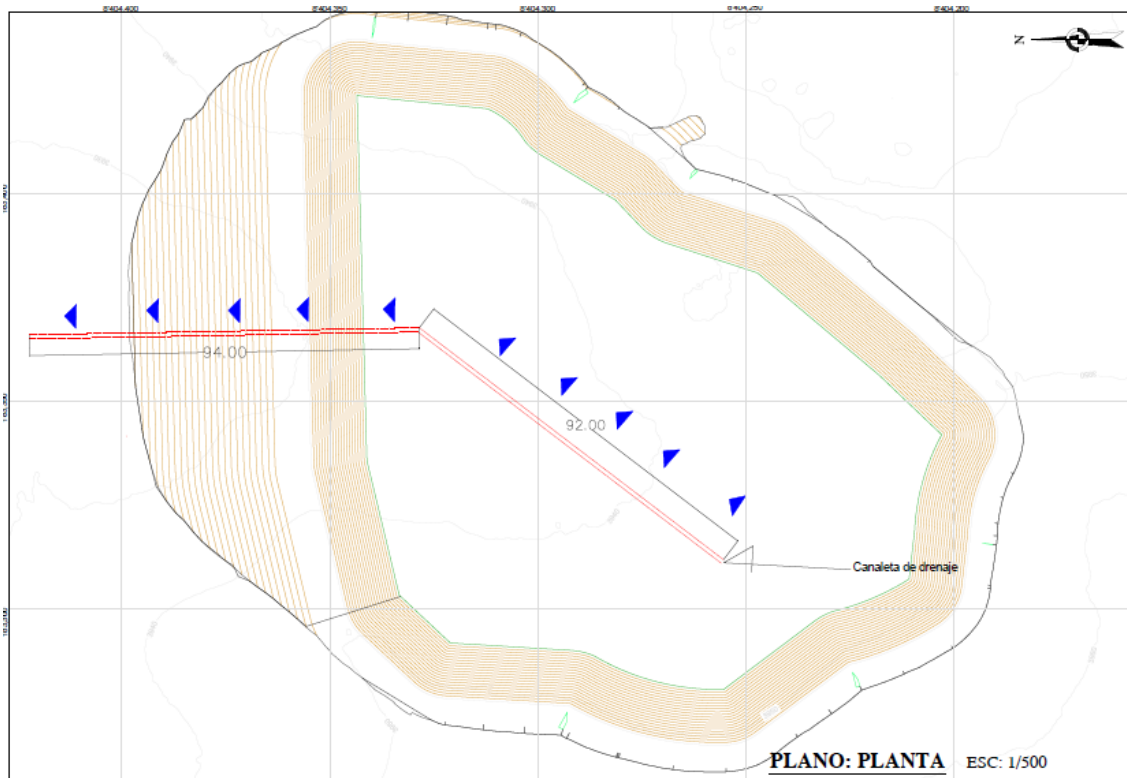
Fuente: Propio

Figura 19: Detalle de geomembrana en canal de coronación



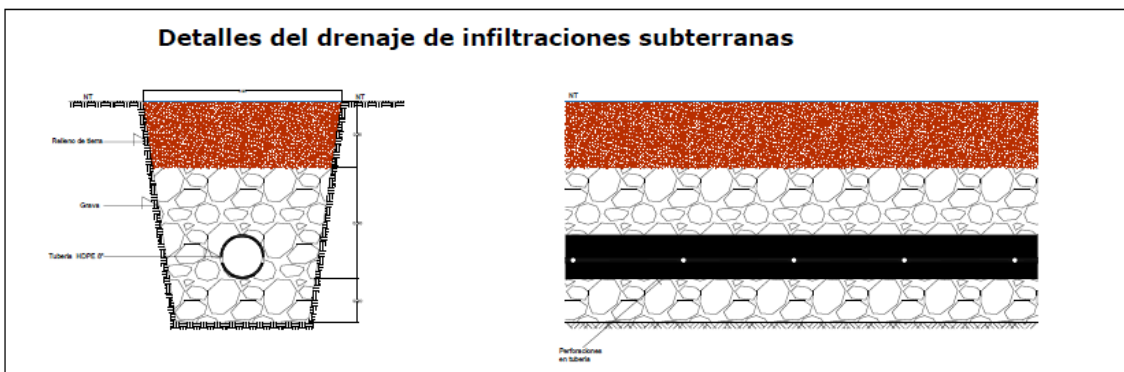
Fuente: Propio

*Figura 20: Dirección del drenaje*



Fuente: Propio

*Figura 21: Detalle de drenaje de infiltraciones subterráneas*



Fuente: Propio

### 3.5.3.2. Diseño estructural

Las metodologías utilizadas para evaluar la estabilidad de los diques de tierra consideran las variaciones en las cargas y el régimen de infiltración desde la etapa de construcción hasta el llenado, calculando en la resistencia al corte del suelo.

El análisis de estabilidad de taludes se realiza bajo condiciones de saturación o desembalse rápido. Sin embargo, en este caso, dichos efectos no serán significativos, ya que el agua del embalse será bombeada para su reutilización en el proceso.

En la operación del dique, se lleva a cabo un análisis estático, verificando los coeficientes de estabilidad frente al volcamiento y gradual, así como las presiones ejercidas sobre el suelo de cimentación, tanto en condiciones normales como en escenarios pseudoestáticos o sísmicos.

### **3.6. Coeficiente sísmico**

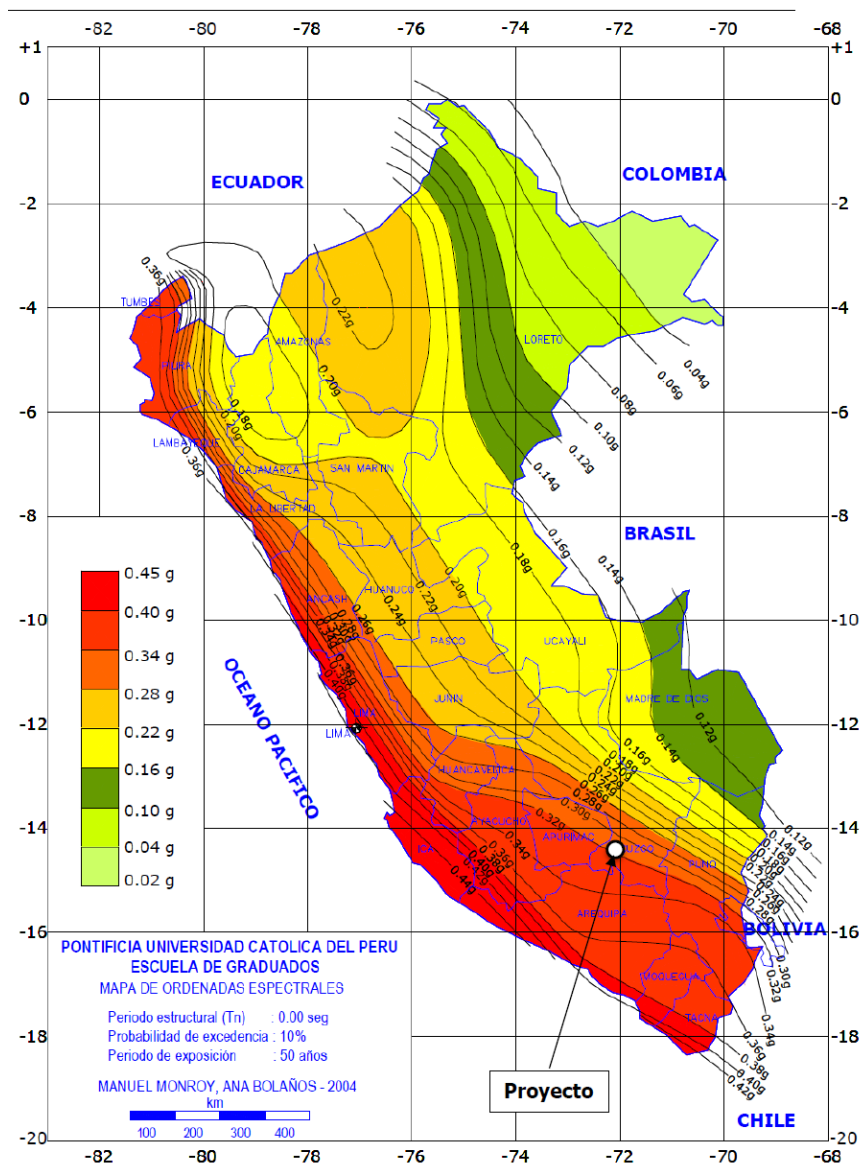
El Perú está situado en una de las regiones de mayor actividad sísmica del mundo, lo que hace imprescindible evaluar el comportamiento potencial de este peligro en áreas específicas. Este análisis es clave para planificar adecuadamente y mitigar los efectos adversos que los eventos sísmicos podrían generar en el futuro. La evaluación del peligro sísmico se constituye, por tanto, en una herramienta fundamental para garantizar la seguridad de las estructuras, especialmente en proyectos de ingeniería minera y civil.

La sismicidad en el territorio peruano, particularmente en la costa, se debe principalmente al proceso de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, así como a la dinámica de las unidades tectónicas continentales. Por otro lado, los sismos en la región Cusco y otras áreas altoandinas del Perú presentan características distintas, relacionadas con fenómenos tectónicos locales. Estas áreas están influenciadas por fallas normales activas cuaternarias, ubicadas en el límite entre la Cordillera Oriental y las altiplanicies entre Cusco y Ayacucho. En Cusco, se han identificado y estudiado diversos sistemas de fallas activas, como las de Zurite, Chincheros, Qoricocha, Tambomachay, Pachatusan y Urcos, así como el sistema de fallas del Vilcanota, que abarca localidades como Pomacanchis, Sangarará y Langui-Layo. Los sismos asociados a estas fallas suelen ser superficiales, con epicentros a profundidades de entre 0 y 60 km, y pueden generar daños significativos, como ocurrió en los eventos registrados en Cusco en 1650, 1959 y 1986, y en Urcos en 1965.

De acuerdo con el Mapa de Ordenadas Espectrales elaborado por la Pontificia Universidad Católica del Perú, para una probabilidad de excedencia del 10 % en un período de 50 años, se estima que la zona de Chamaca, en la provincia de Chumbivilcas,

departamento de Cusco, experimentaría aceleraciones sísmicas de 0.30g. Este nivel de aceleración, correlacionado con la Escala de Mercalli Modificada, sugiere un potencial de daño moderado en caso de sismos. Por ello, en el diseño de la presa de relaves Bedregal, se ha considerado un factor de seguridad del 15 %, garantizando que la infraestructura pueda soportar estas condiciones sísmicas con un margen adecuado de resistencia y estabilidad.

*Figura 22: Determinación de coeficiente sísmico*



Fuente: Propio

### 3.7. Análisis de la estabilidad de la presa

#### 3.7.1. Análisis de estabilidad del dique antes del servicio

El análisis de estabilidad física de la presa de relaves se enfocó en la estabilidad del dique, el cual comprende los siguientes análisis:

- Análisis de estabilidad contra deslizamiento bajo condición estática.
- Análisis de estabilidad contra deslizamiento bajo condición sísmica (Pseudoestático).

Los factores de seguridad mínimos para el diseño del dique es el siguiente:

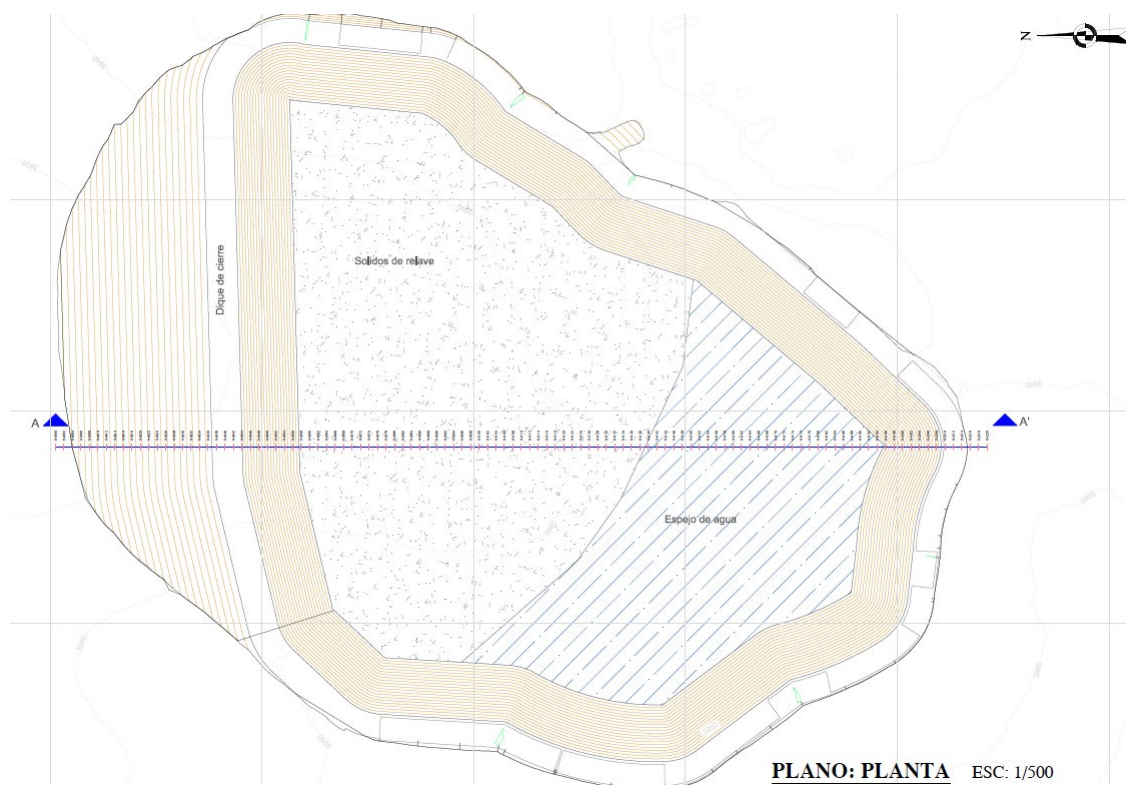
*Tabla 14: Factores de seguridad mínimos*

| <b>Condición</b>         | <b>Factor mínimo de seguridad</b> |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Estático                 | 1.5                               |
| Sísmico (Pseudoestático) | 1.0                               |

Fuente: Propia

El modelamiento del análisis de estabilidad física se ha trabajado en una sección que se muestra en la imagen:

Figura 23: Corte de sección A-A'



Fuente: Propia

Los parámetros de resistencia al corte de cada material fueron definidos en el estudio geotécnico, estos son los siguientes:

Tabla 15 Parámetros de Resistencia al corte

| Descripción          | Densidad Natural<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Parámetros de Resistencia |        |
|----------------------|------------------------------------------|---------------------------|--------|
|                      |                                          | C' (KPa)                  | φ' (°) |
| Suelo de cimentación | 23                                       | 30                        | 30     |
| Relleno del dique    | 20                                       | 25                        | 40     |

Fuente: Propio

El análisis de estabilidad física se ha desarrollado en el programa Slide2 v.9, del cual se tienen los siguientes resultados:

### 3.7.1.1. Ingreso de datos al software Slide2 V.6

Los datos ingresados al software Slide2 V.6, son los de los materiales que intervienen para la estabilidad de la presa, los cuales, con el suelo de la cimentación y el material de relleno del dique, estos fueron los siguientes:

Figura 24: Datos ingresados para el suelo de cimentación

The screenshot shows the 'Define Material Properties' window for 'Suelo de Cimentacion'. The 'Name' field is 'Suelo de Cimentacion', 'Colour' is yellow, and 'Hatch' is black. 'Unit Weight' is 23 kN/m3 and 'Saturated U.W.' is 20 kN/m3. 'Strength Type' is Mohr-Coulomb with the formula  $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$ . 'Strength Parameters' show 'Cohesion' as 30 kN/m2 and 'Phi' as 30 degrees. 'Water Parameters' show 'Water Surface' as Water Table and 'Hu' as Custom with a value of 1. Buttons at the bottom are 'Copy To...', 'OK', and 'Cancel'.

Fuente: Propia

Figura 25: Datos ingresados para el relleno del dique

Define Material Properties

☐ Suelo de Cimentacion ☒ Relleno del Dique ☐ Material 3

Name: Relleno del Dique Colour:  Hatch:

Unit Weight: 20 kN/m3 ☐ Saturated U.W.: 20 kN/m3

Strength Type: Mohr-Coulomb  $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters:

Cohesion: 25 kN/m2 Phi: 40 degrees

Water Parameters:

Water Surface: Water Table Hu: Custom 1

Copy To... OK Cancel

Fuente: Propia

Figura 26: Factor sísmico

Seismic Load

Seismic load coefficient

Horizontal: 0.32 positive in direction of failure

Vertical: 0 positive down

seismic force = (slice weight) x (seismic load coefficient)

OK Cancel

Fuente: Propia

A partir de estos datos ingresados al software se ha realizado el análisis de estabilidad física del dique, para lo cual se van a detallar los resultados correspondientes.

### 3.7.1.2. Resultados de análisis estabilidad física del dique sin entrar en servicio

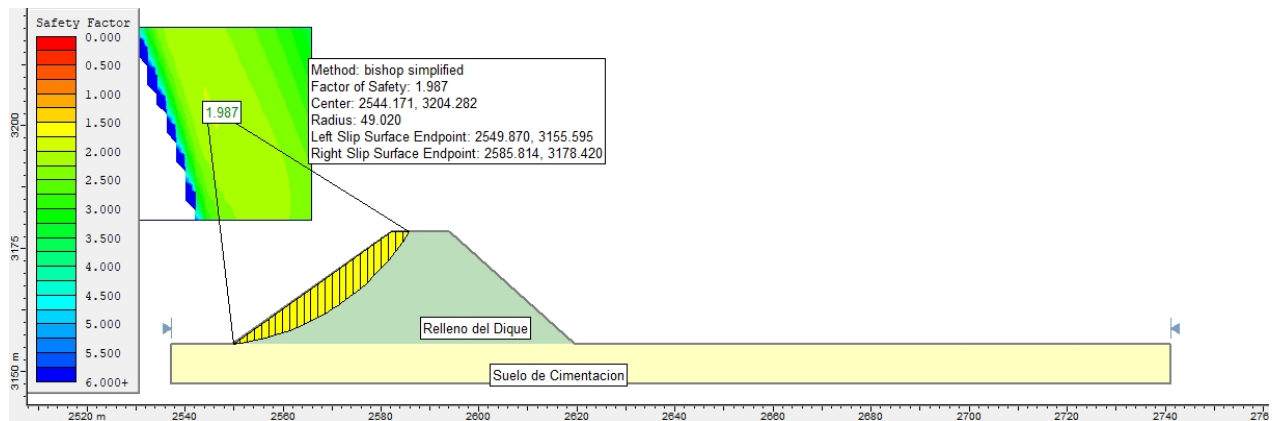


Figura 27: Análisis de factor de seguridad del talud externo del dique – Estático

Fuente: Propio

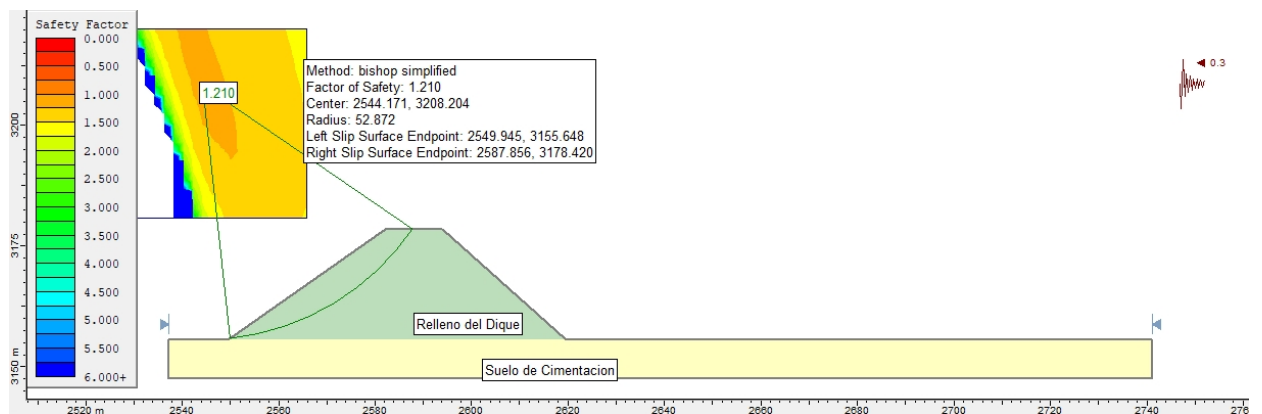


Figura 28: Análisis de factor de seguridad del talud externo del dique – Pseudoestático

Fuente: Propio

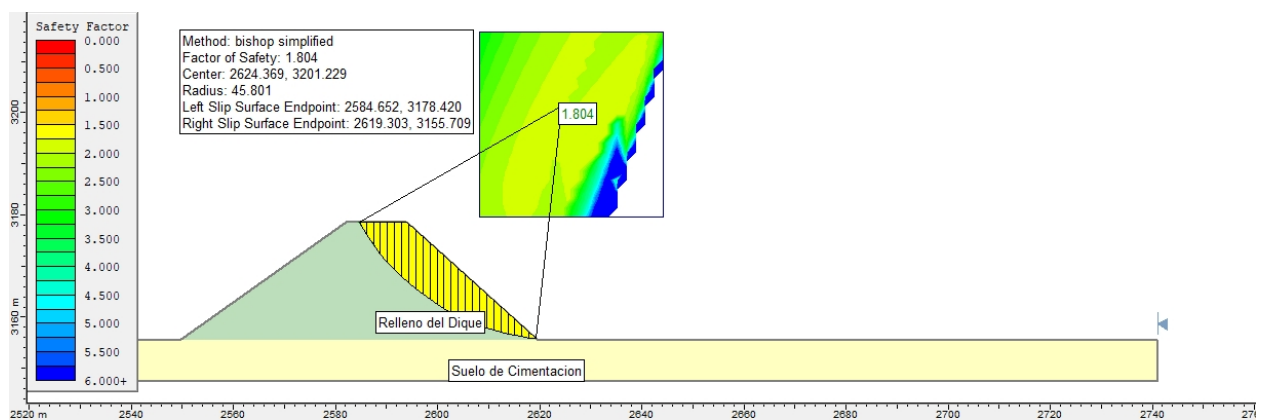


Figura 29: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Estático

Fuente: Propio

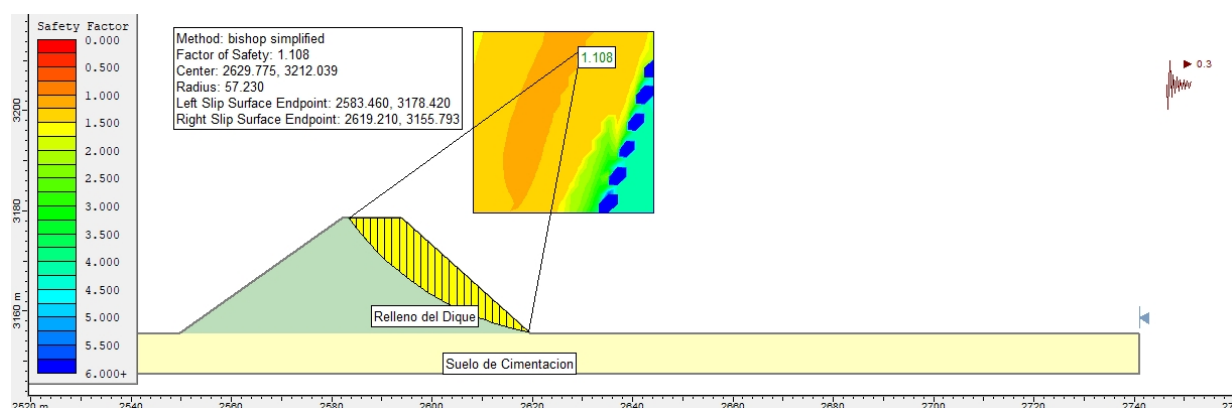


Figura 30: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Pseudoestático

Fuente: Propio

De los resultados obtenidos del análisis de la estabilidad física del dique fuera de servicio son los siguientes:

Tabla 16: Resultado de factor de seguridad estático – pseudoestático

| Descripción              | Factor de seguridad |
|--------------------------|---------------------|
| Externo - Estático       | 1.987               |
| Externo - Pseudoestático | 1.210               |
| Interno - Estático       | 1.804               |
| Interno - Pseudoestático | 1.108               |

Fuente: Propio

De los resultados obtenidos, se puede concluir que los factores de seguridad en el análisis estático son mayores a 1.50 y del análisis pseudoestático es superior a 1.00, superando los parámetros condicionados para el diseño del dique.

### 3.7.1.3. Resultados de análisis estabilidad física del dique al entrar en servicio

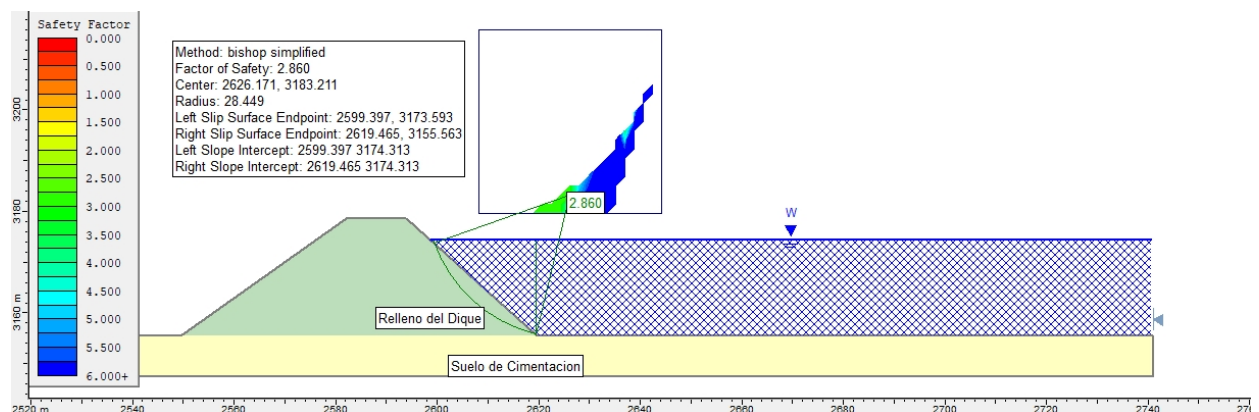


Figura 31: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Estático

Fuente: Propio

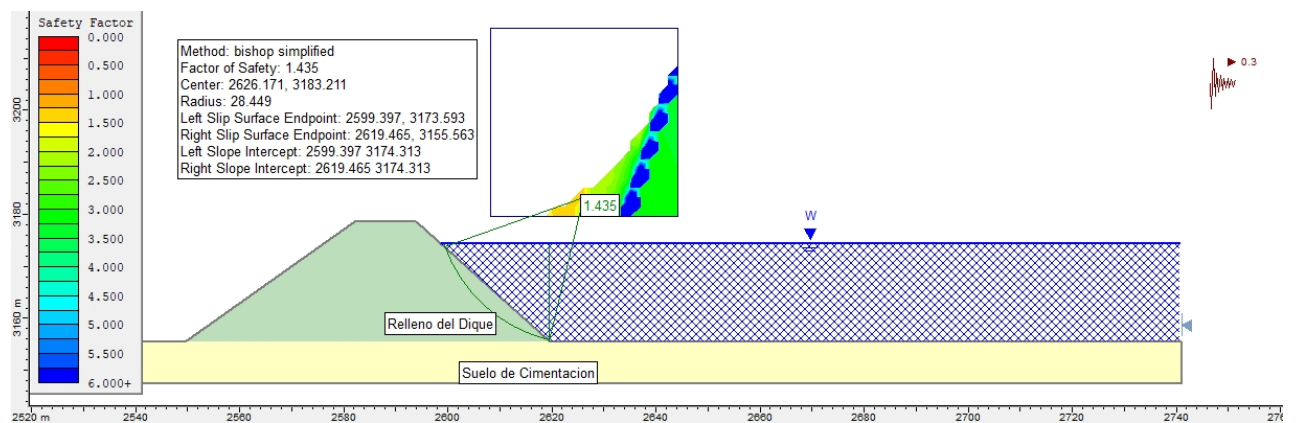


Figura 32: Análisis de factor de seguridad del talud interno del dique – Pseudoestático

Fuente: Propio

De los resultados obtenidos del análisis de la estabilidad física del dique fuera de servicio son los siguientes:

Tabla 17: Resultado de factor de seguridad estático – pseudoestático puesta en servicio

| Descripción              | Factor de seguridad |
|--------------------------|---------------------|
| Interno - Estático       | 2.860               |
| Interno - Pseudoestático | 1.435               |

Fuente: Propio

De los resultados obtenidos, se puede concluir que los factores de seguridad en el análisis estático son mayores a 1.50 y del análisis pseudoestático es superior a 1.00, superando los parámetros condicionados para el diseño del dique.

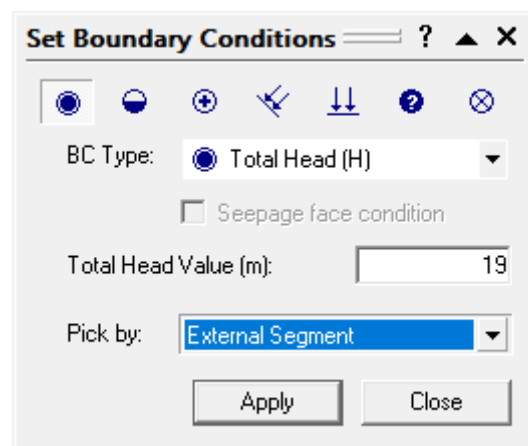
### 3.8. Análisis de filtración de aguas subterráneas

#### 3.8.1. Análisis de filtración según presión

De acuerdo al análisis de la filtración según la presión de la presa se puede observar que los vectores de presión se dirigen al dique donde estará soportando la carga del relave, esta grafica representa la presión por metros.

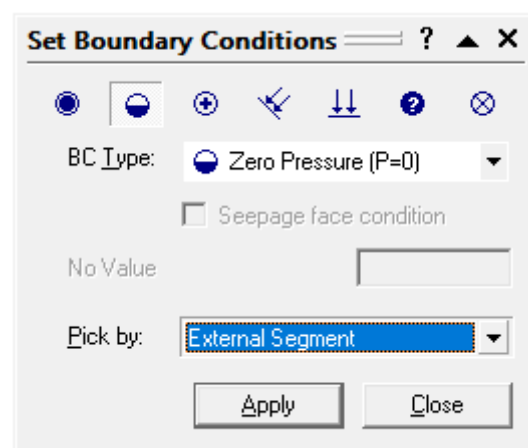
Los datos ingresados al software para el análisis de filtración son los siguientes:

*Figura 33: La condición de altura del nivel de agua de la presa que es 19 m*



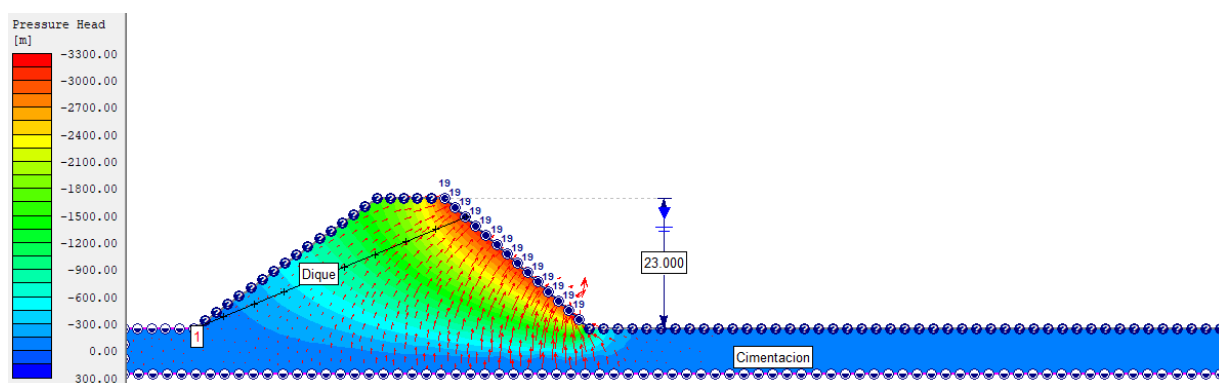
Fuente: Propia

*Figura 34: La presión de las aguas subterránea – para el caso es cero*



Fuente: Propia

*Figura 35: Análisis de filtración de la presa de relave*



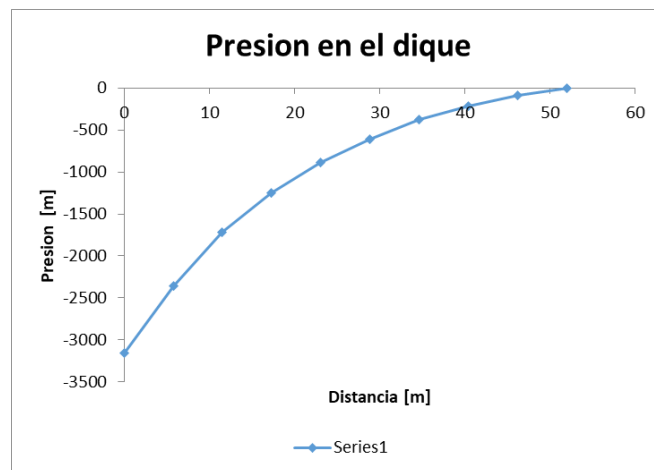
Fuente: Propia

*Tabla 18: Datos obtenidos del análisis de filtración*

| Distancia  | Presión     |
|------------|-------------|
| 0          | -3156.05278 |
| 5.77744705 | -2354.68507 |
| 11.5548941 | -1713.75859 |
| 17.3323412 | -1250.51488 |
| 23.1097882 | -891.12528  |
| 28.8872353 | -604.124157 |
| 34.6646823 | -379.005259 |
| 40.4421294 | -210.745193 |
| 46.2195764 | -83.5561282 |
| 51.9970235 | -8.0985E-12 |

Fuente: Propia

*Figura 36: Presión vs la distancia de la presa*



Fuente: Propia

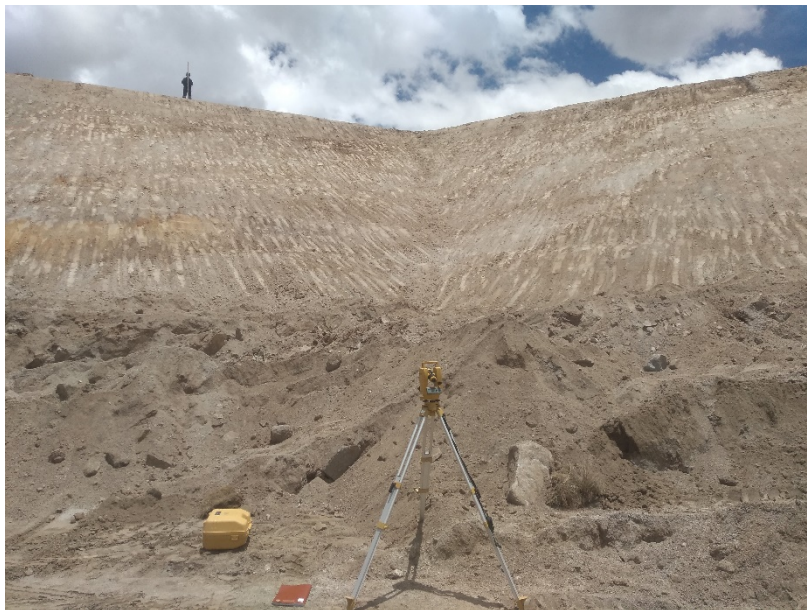
## **CAPITULO IV:**

### **IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. Proceso de construcción de la presa de relaves**

##### **4.1.1. Replanteo y trazo de área de construcción**

Se cuenta con los hitos monumentados y/o estacados de los puntos BM (N: 8'404,238; E: 183,214; Z: 3973.0) y los puntos de referencias REF (N: 8404214.; E: 183294 Z: 3965.00) del levantamiento topográfico que servirá para el replanteo y trazo, una vez realizado el replanteo se realizarán los trazos dejando marcado la cresta del vaso de la presa de relaves para su inicio de la construcción de la misma.



*Fotografía 1: Replanteo*

Fuente: Propio

#### **4.1.2. Retiro de capa arable o topsoil**

Para la preparación del vaso de acumulación, será necesario retirar previamente la cobertura vegetal o capa orgánica hasta una profundidad promedio de 0,20 m. El material removido se almacenará en áreas designadas como depósitos de material orgánico, con el propósito de reutilizarlo posteriormente en la instalación de la cobertura y/o en el cierre de los componentes del proyecto.



*Fotografía 2: Retiro de Topsoil*

Fuente: Propio



*Fotografía 3: Retiro de Topsoil*

Fuente: Propio

#### 4.1.3. Habilitación del área del vaso del depósito

El volumen de material a extraer en el proceso de corte es de 204.921 m<sup>3</sup>, considerando un grado de esponjamiento del 30 % o un factor de 1,3 para su transporte a las áreas designadas.

Posteriormente, se llevará a cabo el replanteo para la instalación del dique de contención, así como de las estructuras de drenaje y subdrenaje, y la proyección del dique de estabilidad. Estos replanteos se realizarán con equipos topográficos, utilizando los puntos de control (BM) y referencias monumentadas con hitos y estacas para garantizar precisión en los trabajos.

#### 4.1.4. Detalles cuantitativos de conformación del vaso del depósito

*Tabla 19: Calculo de volumen de material a extraer*

| <b>Calculo de volumen de material a extraer</b> |                           |
|-------------------------------------------------|---------------------------|
| Volumen in situ                                 | 204,921.00                |
| Factor de esponjamiento                         | 1.3                       |
| Volumen a extraer                               | 266,397.00 m <sup>3</sup> |

Fuente: Propio

*Tabla 20: Calculo de volumen requerido para el dique*

| <b>Calculo de volumen requerido para el dique</b> |                       |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| Volumen del dique                                 | 52,584.00             |
| Factor de compactación                            | 0.7                   |
| Factor de esponjamiento                           | 1.3                   |
| Volumen requerido para conformación del dique     | 75,120 m <sup>3</sup> |

Fuente: Propio

#### 4.1.5. Construcción del dique de cierre de la presa

Para la construcción del depósito de relaves, se ha diseñado un dique de contención que permitirá alcanzar la máxima capacidad de almacenamiento. Este será compactado sobre el terreno natural previamente mejorado mediante procesos de compactación.

El material utilizado para el dique de contención estará compuesto por grava limosa con arena y piedra pequeña, el cual será obtenido de los cortes generados durante la construcción de la misma presa de familiares.



*Fotografía 4: Construcción de Dique*

Fuente: Propio



*Fotografía 5: Cierre de Dique*

Fuente: Propio



*Fotografía 6: Dique culminado*

Fuente: Propio

La compactación del dique se realizará con maquinaria excavadora y volquetes cargados en el transcurso de formación de la misma. El cuerpo del dique de arranque estará conformado por material de corte, compactado a cada metro de crecimiento

*Tabla 21: Características del dique de contención*

| <b>Características del dique de contención</b> |               |
|------------------------------------------------|---------------|
| Longitud de la corona                          | 565.00 m      |
| Ancho de corona                                | 5.00 m        |
| Cota de la corona                              | 3951 msnm.    |
| Relación de talud interno                      | 1.00 H:1.00 V |
| Relación de talud externo                      | 1.50 H:1.00 V |
| Ancho máximo del pie de dique                  | 60 m          |
| Altura máxima del dique                        | 21 m          |
| Volumen del dique                              | 52,000        |

Fuente: Propio

#### 4.1.6. Recubrimiento de la presa de relaves

Para el recubrimiento de la presa de relaves se empleará una geomembrana de HDPE de 1,5 mm de espesor, caracterizada por su alta resistencia a agentes químicos y la radiación ultravioleta. Su baja permeabilidad la convierte en una barrera efectiva contra el paso de fluidos y gases, además de contar con una gran resistencia a la tracción y excelente rigidez, lo que la hace adecuada para este tipo de aplicación.

En el siguiente cuadro se presentan los cálculos de la cantidad total de geomembrana requerida para el recubrimiento de la presa de relaves de la PLANTA BEDREGAL.

*Tabla 22: Datos de presa de relaves*

| Datos de presa de relaves     |                       | Area a recubrir          | Total, de geomembrana requerida |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Área del vaso                 | 28,458 m <sup>2</sup> | 31,978.00 m <sup>2</sup> | 34,859.00 m <sup>2</sup>        |
| Perímetro                     | 565.00 m              |                          |                                 |
| Longitud de berma más anclaje | 2.2 m                 |                          |                                 |
| (%) Traslape                  | 13%                   |                          |                                 |

Fuente: Propio

Según los cálculos realizados el total de geomembrana requerida para el recubrimiento de la presa de relaves del proyecto PLANTA BEDREGAL es 34,859.00 m<sup>2</sup>. Considerándose el traslape y el factor de seguridad.



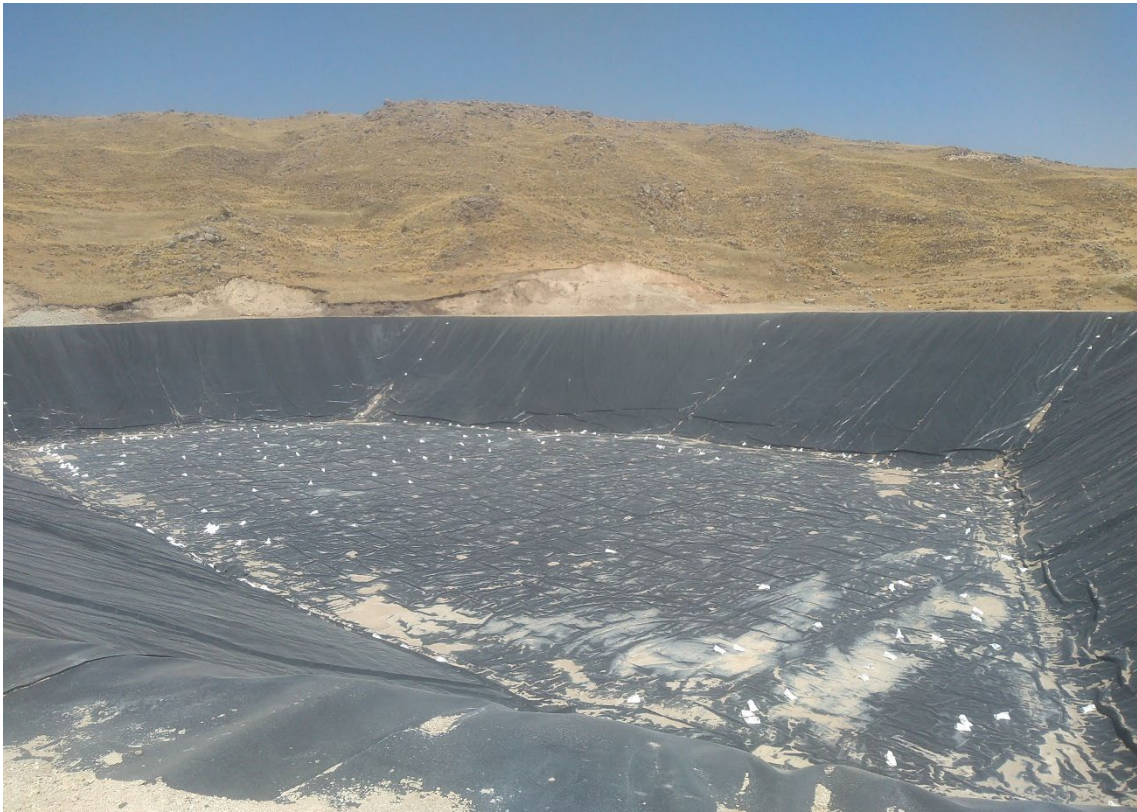
*Fotografía 7: Proceso de tendido de la geomembrana*

Fuente: Propio



*Fotografía 8: Tendido de geomembrana en los taludes.*

Fuente: Propio



*Fotografía 9: Presa de relave culminada*

Fuente: Propio

#### **4.1.7. Diseño de sistemas auxiliares del depósito de relaves**

##### ***4.1.7.1. Drenaje***

Debido a la presencia de infiltraciones de aguas subterráneas por debajo de la impermeabilización de la base del depósito, se ha determinado un sistema de drenaje mediante un dren francés, el cual recolectará las aguas subterráneas debajo de la impermeabilización del depósito de relaves y los conducirá hacia la superficie atravesando la base del dique de contención, para asegurar la estabilidad integral de la presa de relaves.

Se construirá un canal de 180 metros, cuya sección transversal es de 1 m de profundidad por 0.9 de ancho, el cual estará relleno de roca como material drenante, y por el interior se instalará una tubería de polietileno de 8 pulgadas perforado para la evacuación de las aguas.



*Fotografía 10: Drenaje construido*

Fuente: Propio

#### **4.1.7.2. Bombeo**

En el sistema de bombeo el espejo de agua para la recirculación al proceso se ubicará al lado opuesto del dique de contención, para evitar esfuerzos de tensión que ocasionarían colapsos en el propio dique, entonces la pulpa de relave ingresará sobre la construcción del dique de contención a través de un hidrociclón para apilar sistemáticamente los relaves gruesos y finos dentro de la presa, con el fin de optimizar la vida útil de la presa de relaves. El motor de bombeo se instalará en una balsa, desde donde se recirculará el agua a la zona de procesos resaltando el circuito cerrado del proyecto.

#### **4.1.7.3. Canales de coronación.**

Para captar las aguas de escorrentía de la cabecera del contorno superior de la presa de relaves se ha proyectado la construcción de canales de coronación en la periferia de la misma; además se ha proyectado la construcción de canal de coronación en toda la periferia de la base del dique de contención, con el fin de evitar colapsos en el mismo cuando acrecenten la magnitud de las aguas pluviales en épocas de lluvias.

#### 4.1.7.4. Seguridad

La construcción del cerco perimétrico de la presa de relaves, es de mucha importancia por la ubicación del proyecto y la circulación de animales en el área del proyecto. Se considera por seguridad la construcción del cerco perimétrico de la presa de relaves con madera y alambres, para evitar cualquier accidente tanto del personal y de ser necesario se implementará un cerco eléctrico solar para evitar el ingreso de animales del área circundante

#### 4.2. Costo de la construcción de la presa de relave

Para la construcción de la presa de relave, se ha determinado los costos de acuerdo a los establecidos en el presupuesto siguiente:

| Ítem | Descripción                            | Días  | Cantidad | Unidad  | Precio Unitario | Sub Total (S./) |
|------|----------------------------------------|-------|----------|---------|-----------------|-----------------|
| 1.0  | Movilización y desmovilización         | 2.0   |          |         |                 | 12,000.00       |
| 1.1  | Movilización                           | 1.0   | 1        | Unidad  | 6,000.00        | 6,000.00        |
| 1.2  | Desmovilización                        | 1.0   | 1        | Unidad  | 6,000.00        | 6,000.00        |
| 2.0  | Movimiento de tierras                  | 172.3 |          |         |                 | 887,553.61      |
| 2.1  | Maquinaria                             | 172.3 |          |         |                 | 694,172.27      |
|      | Excavadora                             | 172.3 | 1,793    | HM      | 250.00          | 448,172.27      |
|      | Volquete                               | 172.3 | 2,050    | HM      | 120.00          | 246,000.00      |
|      | Rodillo                                | 30.0  | 120      | HM      | 120.00          | 14,400.00       |
| 2.2  | Personal apoyo                         | 200.0 | 2        | Persona | 50.00           | 20,000.00       |
| 2.3  | Combustible                            |       | 14,448   | Galón   |                 | 173,381.34      |
|      | Excavadora (5 Gl/HM)                   |       | 8,963    | Galón   | 12.00           | 107,561.34      |
|      | Volquete (2.5 Gl/HM)                   |       | 5,125    | Galón   | 12.00           | 61,500.00       |
|      | Rodillo (3.0 Gl/HM)                    |       | 360      | Galón   | 12.00           | 4,320.00        |
| 3.0  | Instalación de geomembrana             | 20.0  |          |         |                 | 445,089.02      |
| 3.1  | Materiales                             |       |          |         |                 | 371,713.45      |
|      | Geomembrana HDPE 1.5 mm                |       | 34,859   | m2      | 10.59           | 369,272.78      |
|      | Cordón HDPE                            |       | 120      | Kg      | 20.34           | 2,440.68        |
| 3.2  | Instalación                            |       | 30,923   | m2      | 1.69            | 52,411.12       |
| 3.3  | Pruebas de instalación (certificación) |       | 30,923   | m2      | 0.68            | 20,964.45       |
| 4.0  | Servicios auxiliares                   | 9.0   |          |         |                 | 3,410.00        |
| 4.1  | Canal de coronación                    |       |          |         |                 | 500.00          |
|      | Personal                               | 5.0   | 2        | Persona | 50.00           | 500.00          |
| 4.2  | Cerco perimétrico                      |       |          |         |                 | 2,910.00        |

|  |                            |     |    |         |       |                     |
|--|----------------------------|-----|----|---------|-------|---------------------|
|  | Poste de madera 4" x 2.0 m |     | 75 | Poste   | 15.00 | 1,125.00            |
|  | Alambre de púas            |     | 18 | Rollo   | 60.00 | 1,080.00            |
|  | Grapas                     |     | 15 | Kg      | 7.00  | 105.00              |
|  | Personal                   | 4.0 | 3  | Persona | 50.00 | 600.00              |
|  | <b>Costo directo (S./)</b> |     |    |         |       | <b>1,348,052.63</b> |
|  | <b>IGV 18% (S./)</b>       |     |    |         |       | <b>242,649.47</b>   |
|  | <b>TOTAL (S./)</b>         |     |    |         |       | <b>1,590,702.11</b> |

La construcción de la presa de relaves ha generado un gasto de inversión de S/ 1,590,702.11.

## CONCLUSIONES

- Se concluye que el diseño de la presa de relaves cumple con los criterios de estabilidad estructural, alcanzando un factor de seguridad de 2.860 en condiciones estáticas y 1.435 en condiciones pseudoestáticas, ambos valores por encima de los requerimientos mínimos establecidos para este tipo de infraestructura. La construcción de la presa tuvo un costo total de S/ 1,590,702.11, incluyendo la implementación de geomembranas de impermeabilización, las cuales son esenciales para garantizar un control adecuado y reducir los riesgos de contaminación en el entorno.
- La construcción de la presa de relaves está determinada por dos tipos principales de suelos. El suelo de cimentación presenta una densidad natural de  $23 \text{ kN/m}^3$ , una resistencia al corte de 30 kPa y un ángulo de fricción de  $30^\circ$ . Por su parte, el relleno del dique tiene una densidad natural de  $20 \text{ kN/m}^3$ , una resistencia al corte de 25 kPa y un ángulo de fricción de  $40^\circ$ , características que aseguran la estabilidad de la estructura..
- El diseño de la presa incluye componentes clave, como el dique de contención construido con material de préstamo, un sistema de conducción de relaves desde la planta hasta la presa, un sistema de drenaje superficial mediante canales de coronación, la impermeabilización del vaso con geomembrana HDPE, y un sistema de drenaje de infiltración para evacuar el agua natural bajo el vaso. Estas características garantizan un funcionamiento seguro y un manejo ambientalmente responsable.
- El análisis físico del talud muestra que, en condiciones estáticas, el factor de seguridad del lado externo es de 1.987 y del lado interno de 1.804. En condiciones pseudoestáticas, los factores de seguridad son de 1.210 y 1.108 respectivamente. Todos estos valores superan los mínimos requeridos para el diseño, que son 1.5 en condiciones estáticas y 1.0 en condiciones pseudoestáticas. Esto confirma la estabilidad estructural de la presa, incluso cuando no está en servicio.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un sistema permanente de monitoreo de la estabilidad del dique, incluyendo sensores de deformación, inclinómetros y piezómetros. Estos dispositivos permitirán evaluar el comportamiento del talud en tiempo real, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, asegurando que los factores de seguridad se mantengan dentro de los rangos aceptables a lo largo del tiempo.
- Es fundamental realizar inspecciones regulares y planos de mantenimiento preventivo de los componentes críticos, como el sistema de conducción de relaves, los canales de coronación y el revestimiento de geomembrana HDPE. Esto garantizará la funcionalidad y la impermeabilidad del sistema, minimizando el riesgo de infiltraciones o fallos estructurales.
- Posterior a la construcción, se debe implementar un programa de monitoreo ambiental para controlar posibles filtraciones de contaminantes al entorno.
- Se recomienda realizar capacitaciones periódicas al personal encargado de la operación y el mantenimiento de la presa de relaciones, especialmente en temas de seguridad geotécnica, manejo de relaciones y respuesta a emergencias sísmicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aburto Aburto, M. (2011). *Caracterización de la resistencia de un material de banco para su uso como relleno compactado*. D.F. México : Facultad de Ingeniería Civil de Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alva Hurtado, J. (2005). *Análisis Sísmico de Presas de Relaves*. Seminario de actualización en la UNI.
- Apaza Quispe, S. C. (2019). *Diseño de recrecimiento de la presa de relaves de la unidad de producción UNTUCA-MINERA CORI PUNO SAC*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Asesorías Técnicas Geológicas. (2020). *Estandarizar los procesos relacionados con Presas de Relaves*. Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda.
- Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda. (2020). *Propuesta para Estandarizar los procesos relacionados con PRESAS DE RELAVES*. Lima: Ministerio de Minas y Energía - Perú.
- Bieniawski, Z. (1987). *Engineering Rock Mass Clasification, USA*.
- Braja M. Das. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México : Cengage Learning.
- Gilbert, D. (2014). *La Importancia de la Playa de Relaves Antamina*. 31 Convención Minera.
- Granda Castro, D. J. (2016). *Propuesta de diseño de ampliación de la relavera de la planta de beneficio La López en el cantón Camilo Ponce Enríquez*. Guayaquil: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL - ECUADOR.
- Hernandez Sampieri, R. (2016). *Metodología de la Investigación Las Rutas Cualitativa, Cualtitativa y Mixta*. Mexico: Mc Graw Hill Education.
- León Antunez, J. R. (2009). *Informe Experiencia, presentado a la Universidad Ricardo Palma, sobre: Recrecimiento del dique de relaves Chuspich – Minera Santa Luisa – UEA Huanzala*.
- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MINEM). (2007). *Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina*. (<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guiaestabilidad.pdf>).

- Pagaza Castillo, E. M., & Montesinos Farfan, I. A. (2009). *Estudio de Impacto Ambiental Semi Detallado para la Planta de Beneficio de Ampay*. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Ramos Bosque, D. (2015). *Presas de Tierra*. Managua: Universidad Nacional de Ingenieria - Nicaragua .
- Rimarachin V., P. (2015). *Tratamiento de aguas de efluentes minero – metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales*. Revista Scielo, SCIENDO 18.
- Rocscience. (2020). *Programa Slide V.9*. Rocscience software geotécnico.
- Rojas Linares, E. L. (2002). *Diseño de presas de relaves*.
- Veramendi Jaramillo, J. (2016). *El ABC de la Relaveras*. XI Congreso Nacional de Minería – Piura.
- Yanac Isidro, A. M. (2021). *Análisis del diseño y proceso constructivo de un enrocado utilizando desmontes para la construcción de una presa de relaves-mina La Bonita, Arequipa*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO



*Fotografía 11: Extracción de material del vaso de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 12: Extracción de material del vaso de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 13: Extracción de material del fondo del vaso de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 14: Extracción de material del fondo del vaso de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 15: Conformación de los taludes de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 16: Conformación de los taludes de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 17: Construcción del drenaje de la presa*

Fuente: Propio



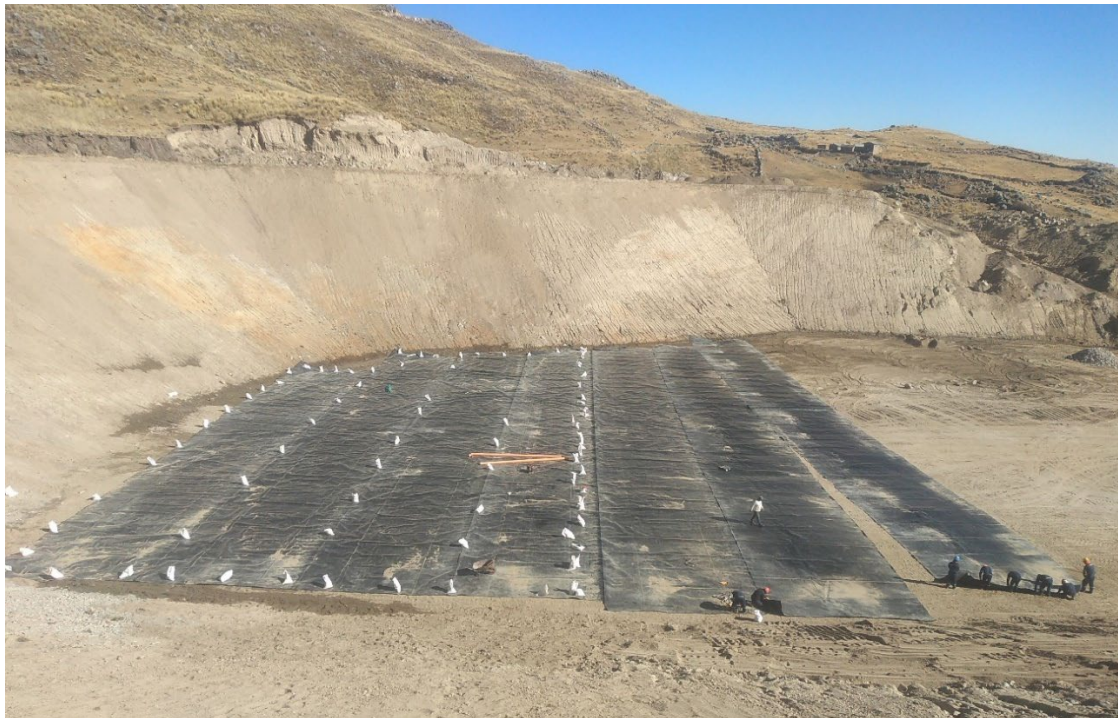
*Fotografía 18: Construcción del drenaje de la presa*

Fuente: Propio



*Fotografía 19: Revestido de la base de la presa con Geomembrana*

Fuente: Propio



*Fotografía 20: Revestido de la base de la presa con Geomembrana*

Fuente: Propio



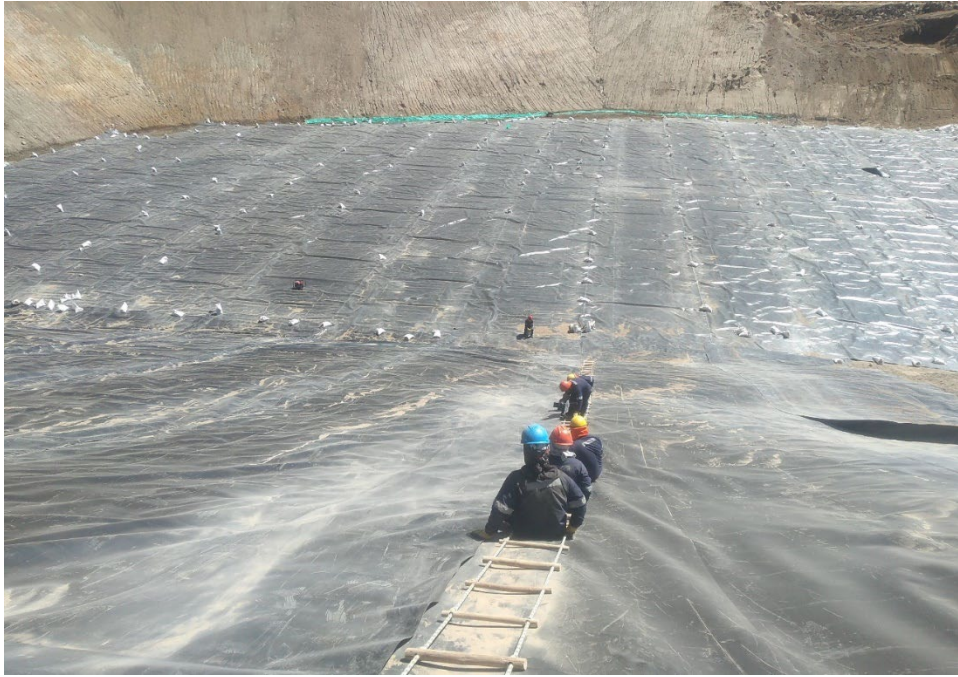
*Fotografía 21: Revestido de la base de la presa con Geomembrana*

Fuente: Propio



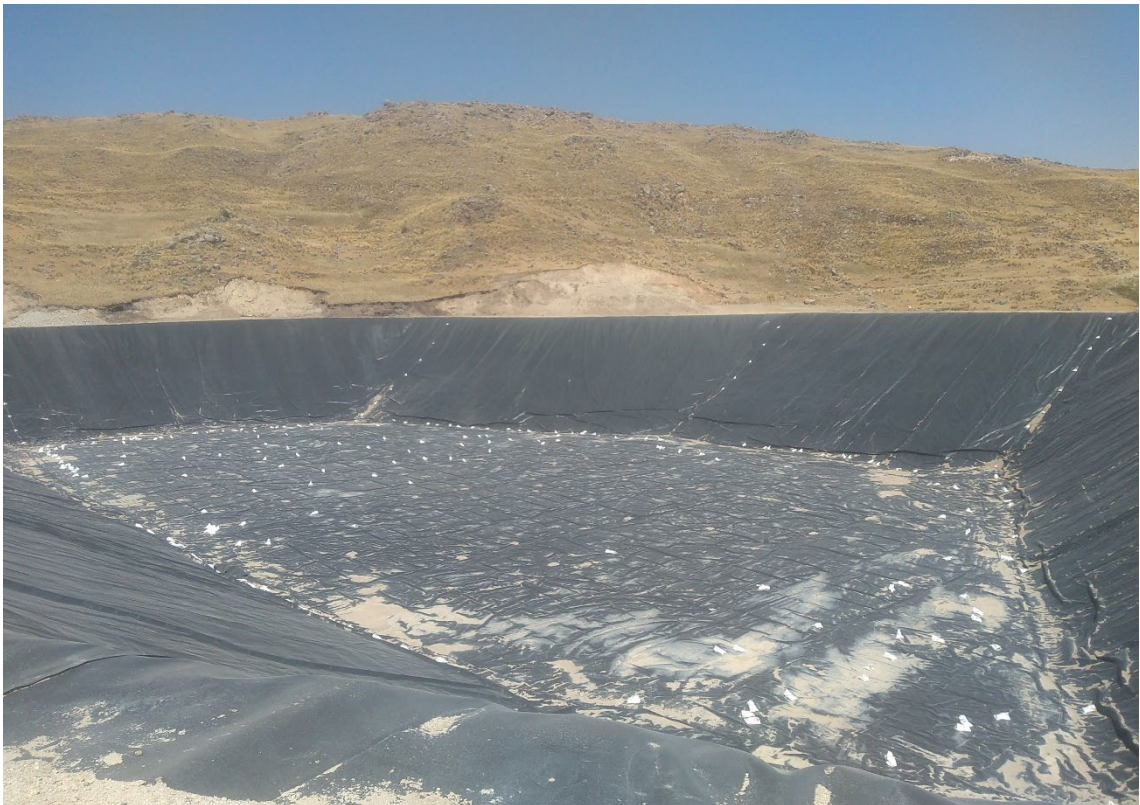
*Fotografía 22: Revestido de talud de la presa con Geomembrana*

Fuente: Propio



*Fotografía 23: Revestido de talud de la presa con Geomembrana*

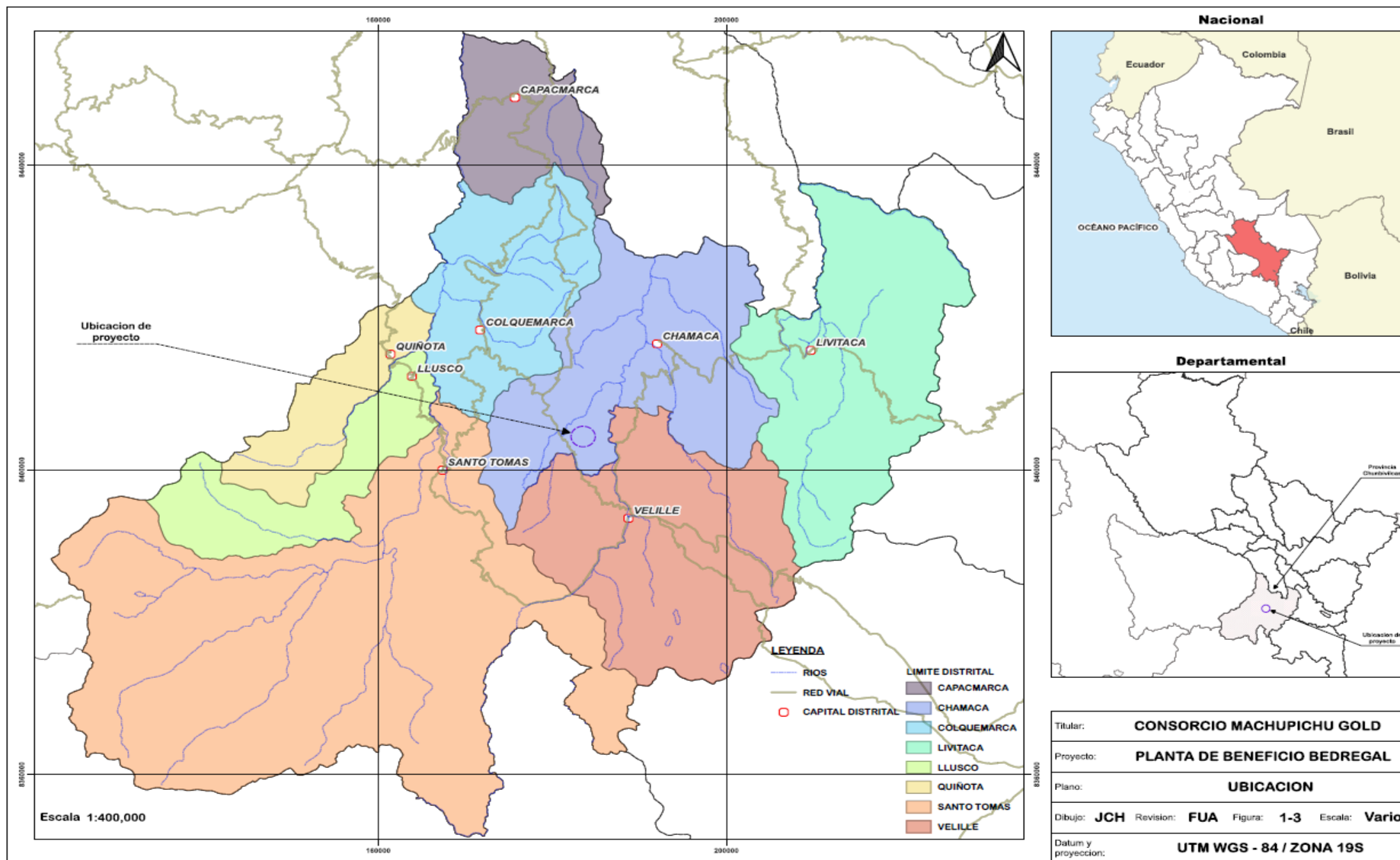
Fuente: Propio

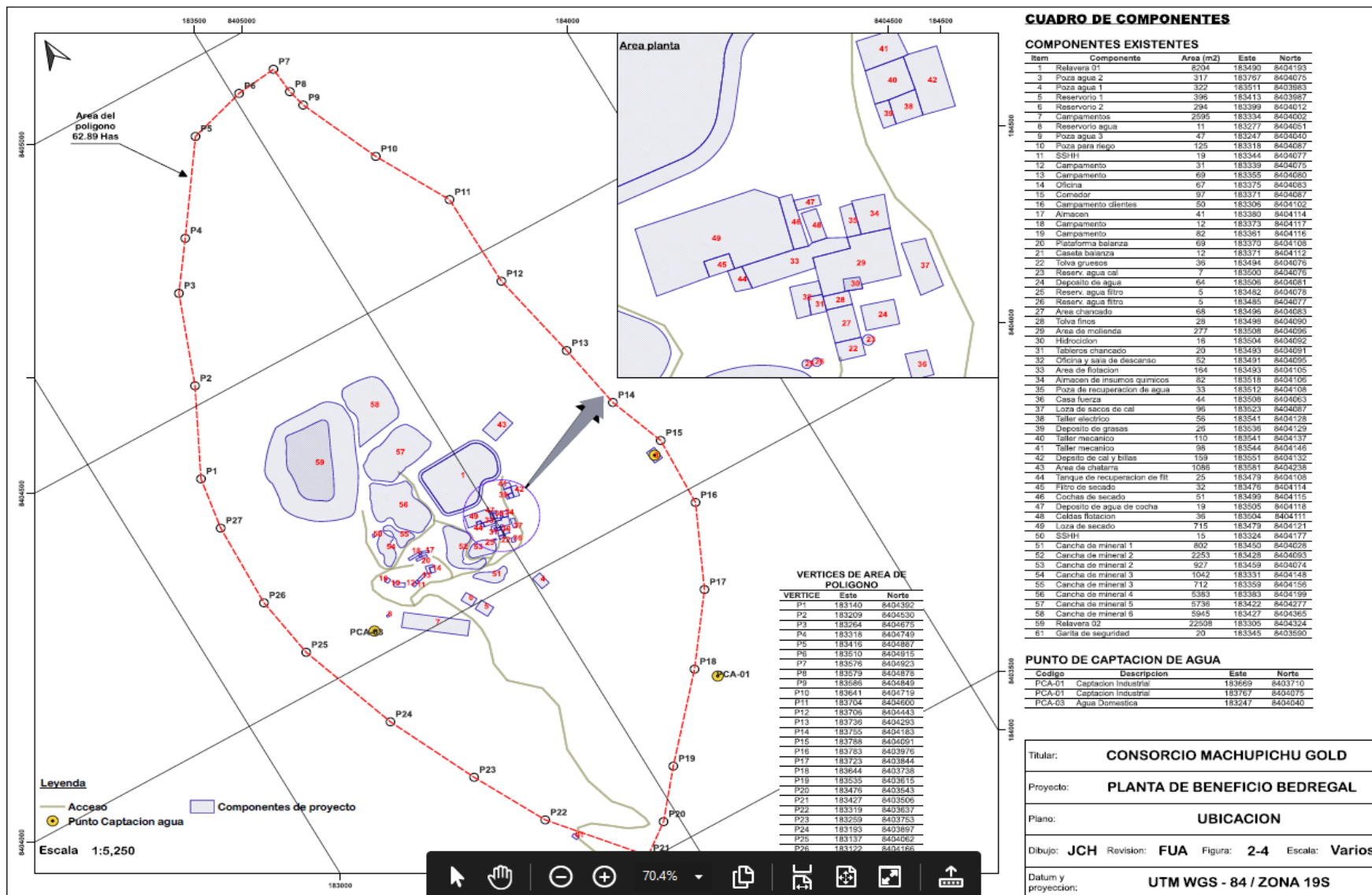


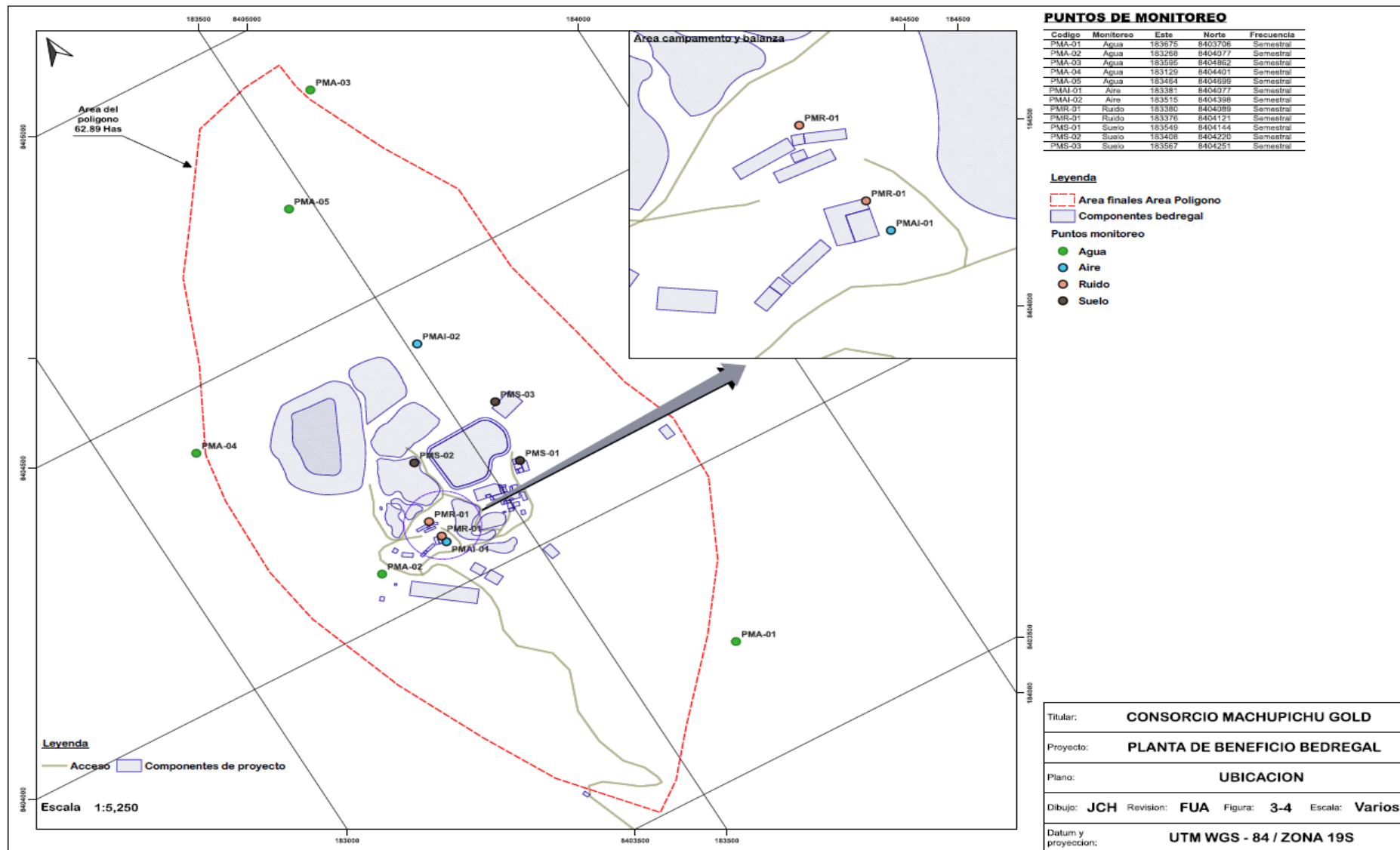
*Fotografía 24: Revestido de final de la presa con Geomembrana*

Fuente: Propio

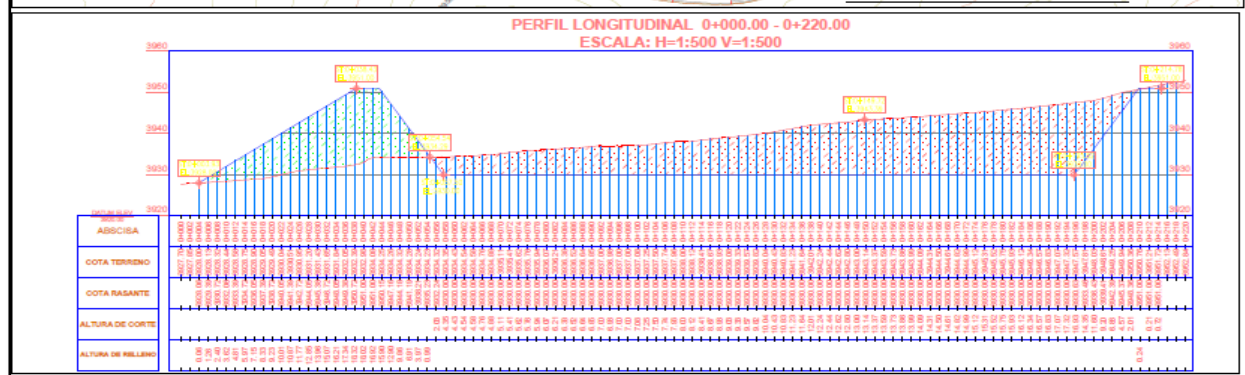
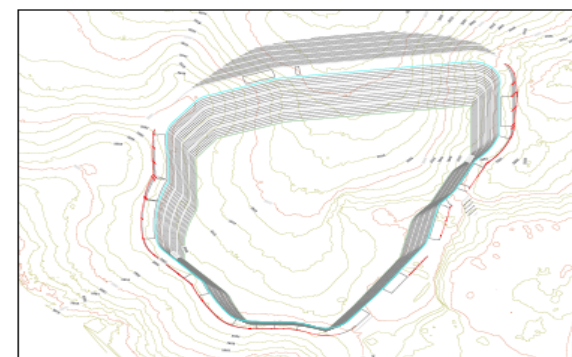
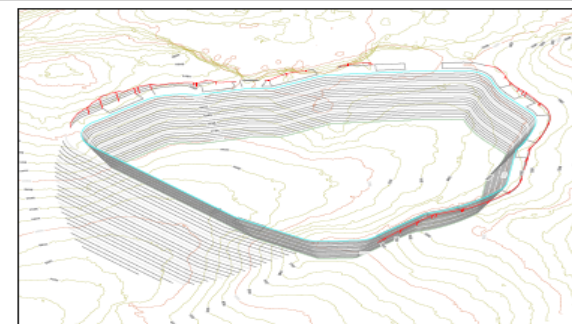
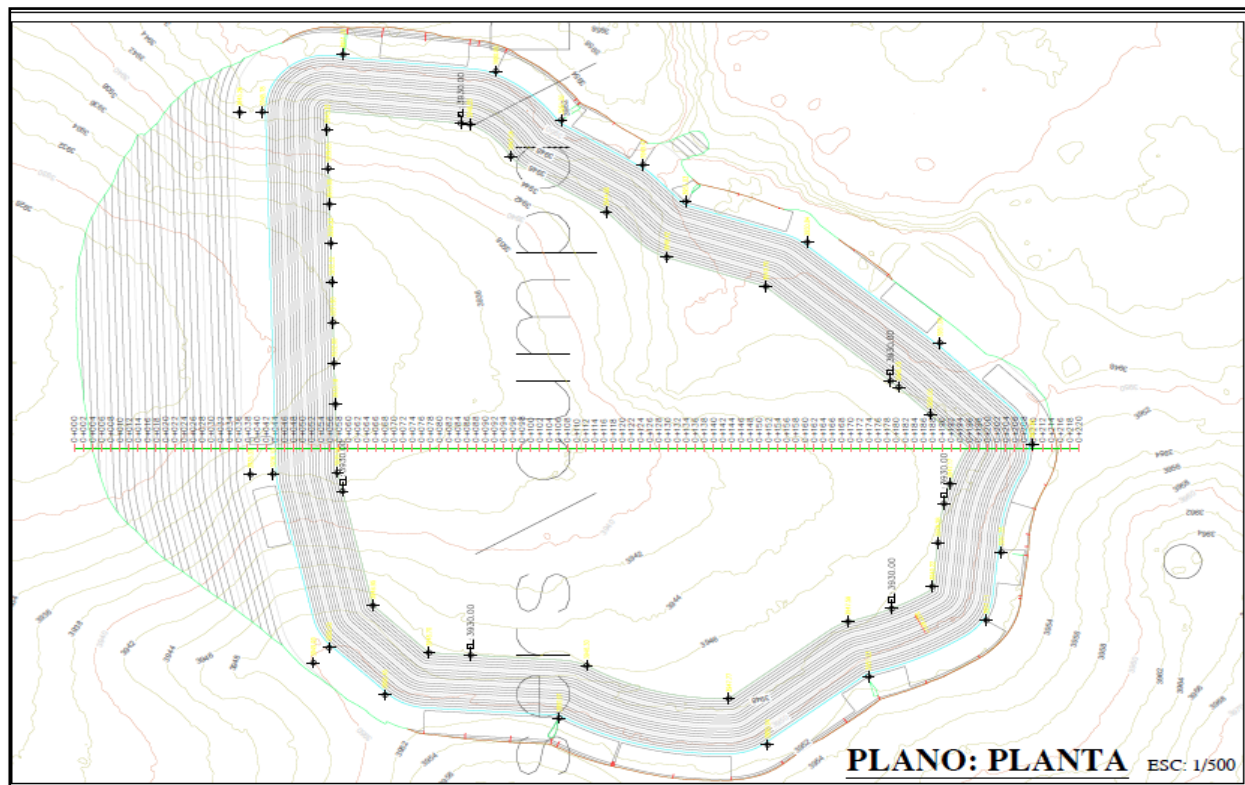
## **ANEXO 2: PLANOS**











Universidad San Antonio Abad del Cusco  
 Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA DE RELIEVE REDREGAL PARA EL CONTROL AMBIENTAL EN CONSORCIO MACRUTECU-GOLD, CHUMBEVILCAS - CUSCO

TÍTULO: TOPOGRAFIA Y PERFIL LONGITUDINAL  
 FOLIO: 1 DE 1  
 A-01

NOMBRE: MARCELO DÍAZ VALDEZAMA PAREDES  
 CARRERA: INGENIERÍA DE MINAS  
 PROFESOR: PLANEA DE DISEÑO DE OBRAS